Élaboration des seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche 1+0 en pépinière forestière selon les régions écologiques du Québec

Mémoire de recherche forestière n° 147
Direction de la recherche forestière

par
Mohammed S. Lamhamedi, Mario Renaud et Linda Veilleux

Québec

105-04239/

Élaboration des seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche 1+0 en pépinière forestière selon les régions écologiques du Québec

Mémoire de recherche forestière n° 147

par

Mohammed S. LAMHAMEDI, ing. f., M. Sc., *Ph. D.*

Mario RENAUD, tech. for.

et

Linda VEILLEUX, tech. labo.

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles,
de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière
2005

Correspondance : mohammed.lamhamedi@mrnfp.gouv.qc.ca

Mandat de la DRF

Le mandat de la Direction de la recherche forestière (DRF) au sein du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs (MRNFP) est de participer activement à l'amélioration de la pratique forestière au Québec. La concrétisation de ce mandat passe par la réalisation de travaux, surtout à long terme et d'envergure provinciale, lesquels intègrent à la fois des préoccupations de recherche fondamentale et de recherche appliquée.

Elle subventionne aussi des recherches universitaires à court ou à moyen terme. Ces recherches, importantes pour le Ministère, sont complémentaires aux travaux de la DRF ou réalisées dans des créneaux où elle ne peut s'impliquer.

Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par un comité *ad hoc* formé d'au moins trois experts indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document à tirage limité est également disponible dans notre site Internet en format pdf.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

Ministère des Ressources naturelles,
de la Faune et des Parcs
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec)
Canada G1P 3W8
Courriel : recherche.forestiere@mrnfp.gouv.qc.ca
Internet : www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/
connaissances/recherche

ISBN 2-550-44100-1
F.D.C. 232.3(047.3)(714)
L.C. SD404
2005-3016

© Gouvernement du Québec
On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence

Notes biographiques

Mohammed S. Lamhamedi, ingénieur forestier, est diplômé de l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (IAV-Hassan II) du Maroc, depuis 1983. Il y détient aussi une maîtrise en sciences forestières (1985). En 1991, il obtient un doctorat de l'Université Laval (U. Laval). De 1986 à 1999, il exerce, de façon successive, les postes d'enseignant-chercheur à l'IAV-Hassan II, de chercheur post-doctoral à l'Université de Montréal, de chercheur-visiteur au Centre de foresterie des Laurentides, de directeur scientifique d'un projet de modernisation de pépinières forestières en Tunisie, d'attaché de recherche au Centre de recherche en biologie forestière (CRBF) de l'U. Laval. Chercheur à la Direction de la recherche forestière, chercheur associé au CRBF et professeur associé à l'U. Laval, ses travaux portent notamment sur la physiologie des plants et les aspects de leur production dans les pépinières (régies de culture, tolérance au gel, variabilité clonale et embryogénèse somatique). Le transfert et l'adaptation de l'expertise québécoise, afférents à la modernisation des pépinières forestières des pays en développement, constituent une facette de son travail.

Mario Renaud est technicien forestier spécialiste, diplômé du cégep de Sainte-Foy depuis 1978. À l'emploi du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec depuis 1979, il est présentement affecté au Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie, où il assiste le chargé de projets en physiologie végétale (production de plants).

Linda Veilleux est technicienne en chimie analytique, diplômée du cégep de Lévis-Lauzon en 1981. De 1982 à 1984, elle a travaillé au pilotage industriel à l'usine de MAGNAQ-SNA (magnésium-amiante-Québec). À l'emploi du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec depuis 1985, elle est présentement affectée au Service de la génétique, de la reproduction et de l'écologie, où elle assiste le chargé de projets en physiologie végétale (production de plants).

Avant-propos

Ce mémoire de recherche forestière constitue l'étape ultime du projet de recherche intitulé : « Élaboration de seuils de tolérance au gel selon les régions écologiques des plants d'épinette blanche 1+0 produits dans les récipients à parois ajourées ». Ce projet a été élaboré et réalisé à la Direction de la recherche forestière (DRF) sous la supervision du Dr. Mohammed S. Lamhamedi, chercheur, et de l'appui et la supervision techniques de M. Mario Renaud (technicien forestier spécialiste) et de Mme Linda Veilleux (technicienne en chimie analytique). Les expériences qui y sont décrites ont été effectuées en 1999 et 2000, dans trois pépinières privées (Sargim, Pampev, CPPFQ) et trois pépinières gouvernementales (Sainte-Luce, Normandin, Trécesson), toutes situées dans des régions écologiques différentes. L'objectif général de ce projet est de concevoir des outils simples qui permettront aux pépiniéristes de réduire les pertes de plants attribuées au gel automnal.

Le contenu de ce mémoire de recherche s'adresse à une clientèle-cible, les pépinières privées et gouvernementales, en vue de : i) les informer sur l'état d'avancement de nos connaissances, sur un thème particulier; ii) leur préciser davantage les approches utilisées; et iii) leur présenter les possibilités d'utilisation des résultats obtenus, tout en mettant l'accent sur leurs limites. De plus, les résultats obtenus et les approches élaborées dans ce mémoire peuvent être utilisés aussi bien par les étudiants de deuxième et de troisième cycles, que par les professeurs, les physiologistes, les *modélisateurs* et les généticiens soucieux de suivre, en pépinière forestière, le comportement des plants, eu égard au gel automnal, pour lesquels les semences sont issues de vergers à graines différents.

Certains résultats de ce mémoire ont déjà fait l'objet de plusieurs activités de transfert de connaissances auprès des pépinières gouvernementales et privées du Québec, de même qu'auprès de la communauté scientifique (Forum de transfert sur la recherche en aménagement et en environnement forestiers du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies, 2004; posters du Carrefour de la recherche forestière, 2003; colloque organisé en marge du Carrefour de la recherche forestière, 2003 sur la filière de production de plants au Québec : de la semence à la plantation, 70e Congrès de l'Acfas, 2002; réunion annuelle des pépinières forestières gouvernementales, 2002; réunion annuelle du groupe technique des pépinières forestières, 2001). De plus, une partie des données de ce projet a fait l'objet d'un mémoire de fin d'études en statistiques à l'Université Laval réalisé par : Couture, E. et M.E. Tremblay, 2000. Tolérance au gel de l'épinette blanche 1+0 produite dans les récipients à parois ajourées, 84 p.

Remerciements

Nous désirons remercier tous ceux et celles qui ont contribué activement aux différentes phases de ce projet de recherche, et en particulier M. Daniel Girard, tech. for. et Mme Monique Pelletier, tech. labo., de la Direction de la recherche forestière (DRF) du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs (MRNFP), Mmes Édith Couture et Marie-Ève Tremblay, statisticiennes à l'Université Laval, ainsi que M. Onil Bergeron, étudiant gradué au doctorat à l'Université Laval, Dr. Pierre Bernier, chercheur au Centre de foresterie des Laurentides (CFL) du Service canadien des forêts (SCF), la Direction de la production des semences et des plants (MRNFP), ainsi que tout le personnel des pépinières (CPPFQ, Normandin, Pampev inc., Sainte-Luce, Sargim inc. et Trécesson) où se sont déroulées les expériences.

Nous adressons aussi nos remerciements à toute l'équipe du Laboratoire de chimie inorganique de la Direction de la recherche forestière (DRF), pour l'analyse des échantillons de substrats et tissus, ainsi qu'à l'équipe de biométrie, plus particulièrement Mme Isabelle Auger et M. Louis Blais, statisticiens à la DRF pour les analyses statistiques.

Nous remercions également Mme Claude Richer du Centre de recherche et de développement en horticulture (Agriculture et Agroalimentaire Canada), Mme Michèle Tourigny de la Direction de la production des semences et des plants (MRNFP) ainsi que M. Daniel Dumais de la DRF, qui ont bien voulu faire la critique de ce mémoire. Nos remerciements s'adressent aussi à Mme Sylvie Bourassa pour la mise en page, à MM. Pierre Bélanger et Marc-Antoine Prévost-Gagnon (étudiant) de la DRF, pour la révision complète et l'édition de ce mémoire de recherche forestière.

Résumé

Au Québec, les pertes annuelles causées uniquement par le gel sont importantes. Ces pertes, à l'échelle de la pépinière, peuvent varier de 5 à 30 % selon l'intensité et la durée du gel. Pour assurer une meilleure protection des cultures lorsque les températures baissent sous le point de congélation, les pépiniéristes ont recours à l'irrigation jusqu'à ce que la température de l'air soit supérieure à 0 °C. Les pépiniéristes ne disposent pas de seuils graduels de tolérance au gel et de variables facilement mesurables en pépinière lesquels leur permettraient de connaître le degré de tolérance au gel des plants d'épinette blanche (1+0) (*Picea glauca* [Moench] Voss) et ainsi optimiser les fréquences d'irrigation. L'objectif général de cette étude est d'élaborer des seuils de tolérance au gel, déduits de modèles mathématiques, lesquels permettraient aux pépiniéristes de mieux cibler les périodes de risque de gel et de prendre les mesures de protection adéquates. À cet effet, des tests de congélation artificiels (4, -4, -8, -12 et -20 °C) effectués, ont servi à évaluer la variabilité, durant l'automne, du degré d'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0) dont les semences sont issues de différents vergers à graines.

Les plants ont été produits dans six pépinières forestières (CPPFQ, Normandin, Pampev inc., Sainte-Luce, Sargim inc. et Trécesson) situées dans différentes régions écologiques. Le degré d'endurcissement a été déterminé à l'aide de tests de viabilité lesquels regroupent : la conductivité électrolytique relative (CR), l'indice de dommages des parties aériennes (I_t), le pourcentage de la perte en eau des racines (PPE), la capacité de croissance des racines (CCR) et le ratio de matière sèche par rapport à la matière fraîche des parties aériennes (RMS). Toutes ces variables de caractérisation de la tolérance au gel des plants ont varié de façon significative selon les dates d'échantillonnage. Le suivi de ces variables a montré que l'endurcissement des plants d'épinette blanche est un processus dynamique lequel varie selon un taux d'acquisition de tolérance au gel variable entre les dates d'échantillonnage. Le RMS s'ajuste significativement à un modèle hyperbolique en fonction du PPE et de la CR. Des seuils de tolérance au gel quotidien ont été déterminés pour chaque pépinière forestière. Ces seuils sont calculés de façon à ce qu'aucun constituant du plant d'épinette blanche (1+0) ne soit endommagé. Le cumul du nombre d'heures d'exposition au froid et le RMS sont des variables facilement mesurables, que le pépiniériste peut utiliser pour déterminer les seuils de tolérance au gel en automne. Les seuils rapportés dans le présent mémoire sous-estiment les seuils réels de tolérance au gel des plants.

Ces seuils permettront aux pépiniéristes de mieux cibler les périodes de risque de gel et leur faciliteront la prise de décision en matière de protection des plants. Cependant, l'optimisation des seuils de tolérance au gel, à l'échelle de la pépinière et de la région écologique, nécessitera de la part du pépiniériste, un calibrage à long terme. L'approche mise au point dans ce mémoire pourra être utilisée pour la caractérisation de l'endurcissement et du *désendurcissement* des autres essences en pépinière, pour leur introduction dans les sites les plus nordiques, la sélection clonale hâtive des essences commerciales et à croissance rapide, l'évaluation des risques de gel liés au déplacement des semences, et la caractérisation des seuils de tolérance au gel des vergers à graines.

Mots clés : Épinette blanche, *Picea glauca*, région écologique, pépinière forestière, endurcissement, gel, tests de viabilité, modélisation, seuils de tolérance au gel.

Abstract

*The loss of forest tree seedlings due to frost damage is of great concern in the province of Québec. Depending on the severity of the frost, losses can account for 5 to 30% of annual forest nursery production. To protect their plants, seedling producers resort to irrigating their stock when air temperatures drop below 0°C. At present, there are neither established frost tolerance thresholds nor variables that can be easily measured in the nursery to help nurserymen determine the degree of frost tolerance of white spruce (*Picea glauca *[Moench] Voss) seedlings and optimize irrigation. The general objective of this study was to propose hardening schedules, determined by mathematical models, which will enable nurserymen to better define periods of frost risk and adequately protect plants. To this end, different seed orchards of white spruce seedlings (1+0) were subjected to artificial freezing tests (4, -4, -8, -12 and -20°C) in the autumn of their first growing season.*

The plants were produced in six different forest nurseries (CPPFQ, Normandin, Pampev inc., Sainte-Luce, Sargim inc. and Trécesson), each of which is located in a different ecological region of the province of Québec. The degree of hardening was determined by viability tests which included relative electrolytic conductivity (CR), shoot damage index (I_j), percentage of water loss from the root tissue (PPE), root growth capacity (CCR) and the ratio of dry shoot biomass to fresh shoot biomass (RMS). All of these variables, which are characteristic of the degree of tissue frost tolerance, varied significantly with sampling date. The rate of acquisition of frost tolerance was very variable between sampling dates, indicating that hardening of white spruce seedlings is a dynamic process. RMS fit a hyperbolic model with respect to PPE and CR. Hardening schedules and daily frost tolerance thresholds were determined for each forest nursery. Frost tolerance thresholds were established above levels at which the seedlings showed frost damage and therefore underestimated the actual frost tolerance of the plants. The accumulation of chilling hours and the RMS are easily measured. These variables can then be used by nurserymen to determine autumnal frost tolerance thresholds. Hardening schedules permit seedling producers to better estimate the risk of frost and anticipate the amount and type of protection needed. Meanwhile, optimisation of frost tolerance thresholds for individual nurseries and for multiple nurseries within a region require nursery workers to re-evaluate and adjust the thresholds to account for climatic variations over the long term. The approach developed in this study for white spruce can be used to characterize hardening and de-hardening for other species under nursery conditions. It can also be used to evaluate the introduction of seedlings on more northerly sites, early selection of clones of fast growing and commercial species, the risks associated with transferring seeds, and for characterizing the frost tolerance thresholds in seed orchards.

Key words : Picea glauca, *ecological region, forest nursery, hardening, frost, viability tests, modelling, schedules and limits of frost tolerance.*

Table des matières

page

Avant-propos iii

Remerciements v

Résumé vii

Liste des tableaux et des annexes xi

Liste des figures xiii

Introduction 1

Chapitre premier - Matériel et méthodes 3
1.1 Matériel végétal 3
1.2 Évaluation de la tolérance au gel et dispositifs expérimentaux 3
1.2.1 Ratio de matière sèche 7
1.2.2 Conductivité électrolytique et indice des dommages foliaires 7
1.2.3 Perte en eau des racines 8
1.2.4 Capacité de croissance des racines et évaluation des dommages de la partie aérienne 8
1.3 Variables environnementales 9
1.4 Analyses statistiques 9
1.5 Détermination des seuils de tolérance au gel 10

Chapitre deux - Résultats 13
2.1 Variables environnementales 13
2.2 Tolérance au gel 13
2.2.1 Conductivité électrolytique et indice de dommages des parties aériennes 13
2.2.2 Perte en eau des racines 19
2.2.3 Capacité de croissance des racines (CCR) en relation avec leur pourcentage de perte en eau 19
2.2.4 Indice de Jian 27
2.3 Modèles mathématiques reliant le ratio de matière sèche à la conductivité électrolytique et au pourcentage de perte en eau des racines 27
2.4 Seuils de tolérance au gel et prévision des risques de gel 27

Chapitre trois - Discussion 35

Conclusion et recommandations 39

Références bibliographiques 41

Liste des tableaux et des annexes

page

Tableau 1. Caractéristiques des six pépinières et de leurs plants d'épinette blanche (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées dans des régions écologiques distinctes 4

Tableau 2. Comparaisons multiples des moyennes de la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne entière des plants d'épinette blanche (1+0) entre les températures de congélation, par date d'échantillonnage 18

Tableau 3. Comparaisons multiples des moyennes de la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne entière des plants d'épinette blanche (1+0) entre les dates d'échantillonnage, par température de congélation 20

Tableau 4. Comparaisons multiples des moyennes du pourcentage de perte en eau des racines des plants d'épinette blanche (1+0) entre les températures de congélation, par date d'échantillonnage 23

Tableau 5. Comparaisons multiples des moyennes du pourcentage de perte en eau des racines des plants d'épinette blanche (1+0) entre les dates d'échantillonnage, par température de congélation 24

Tableau 6. Coefficients de corrélation des régressions simples reliant le ratio de matière sèche de la partie aérienne (Ratio MS-MF) au pourcentage de perte en eau des racines (PPE) et à la conductivité électrolytique relative (CR) de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (1+0), pour chaque température de congélation 28

Tableau 7. Modèles mathématiques hyperboliques reliant le ratio de matière sèche de la partie aérienne (Ratio MS-MF) au pourcentage de perte en eau des racines (PPE) et à la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne des plants (CR) d'épinette blanche (1+0), pour chaque température de congélation 30

Annexe 1a. Seuils de tolérance au gel quotidiens des plants d'épinette blanche (1+0) dans chacune des pépinières, en 1999 49

Annexe 1b. Seuils de tolérance au gel quotidiens des plants d'épinette blanche (1+0) dans chacune des pépinières, en 2000 51

Liste des figures

page

Figure 1. Répartition géographique des 24 pépinières forestières de la province de Québec 5

Figure 2. Modalités d'échantillonnage et évaluation des variables de tolérance au gel des plants échantillonnés dans chaque bloc, et ce pour chaque date d'échantillonnage et chacune des pépinières 6

Figure 3. Exemple d'un cycle de congélation illustrant les températures à atteindre , ainsi que le maintien constant de chaque température-cible sous forme d'un « palier », durant une heure 7

Figure 4. Variations des températures quotidiennes maximales, moyennes et minimales dans la rhizosphère, à la base des plants et à 2 m, sous tunnel, lors de l'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0) produits dans trois pépinières forestières (Trécesson, Sainte-Luce et Pampev) durant l'automne 1999 14

Figure 5. Variations des températures quotidiennes maximales, moyennes et minimales dans la rhizosphère, à la base des plants et à 2 m, sous tunnel, lors de l'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0) produits dans trois pépinières forestières (CPPFQ, Sargim et Normandin) durant l'automne 2000 15

Figure 6. Cumul du nombre d'heures d'exposition au froid à la base des plants d'épinette blanche (1+0) dans différentes pépinières forestières durant l'automne 1999 et 2000 16

Figure 7. Variations de la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (1+0), durant l'automne, en fonction des températures de congélation dans les six pépinières forestières 17

Figure 8. Variations de l'indice de dommages (I_j) de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (1+0), durant l'automne, en fonction des températures de congélation dans les six pépinières forestières 21

Figure 9. Variations du pourcentage de perte en eau des racines des plants d'épinette blanche (1+0), durant l'automne, en fonction des températures de congélation dans les six pépinières forestières 22

page

Figure 10. Formation de nouvelles racines des plants d'épinette blanche (1+0) lors des différentes dates d'échantillonnage selon les traitements de gel pour les six pépinières forestières 25

Figure 11. a- Exemple des dommages causés aux parties aériennes et racinaires des plants d'épinette blanche (1+0) en réaction aux différentes intensités de gel artificiel et après à une période favorable de croissance de 21 jours dans des pots placés en serre.
b- Tolérance des parties aériennes des plants d'épinette blanche (1+0) aux différentes intensités de gel artificiel évaluées.
c- Tolérance des parties aériennes des semis d'épinette blanche (1+0) aux différentes intensités de gel artificiel évaluées 26

Figure 12. Exemple d'illustration graphique du modèle mathématique hyperbolique reliant le ratio de matière sèche de la partie aérienne (ratio MS/MF) à la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne (CR) et au pourcentage de perte en eau des racines (PPE) à différentes températures pour la pépinière de Trécesson 29

Figure 13. Évolution des seuils de tolérance au gel, dans chacune des six pépinières 31

Figure 14. Exemple d'évolution des dommages causés aux plants d'épinette blanche (1+0) en réaction aux différentes températures de gel artificiel durant les différents échantillonnages effectués à la pépinière de Sargim inc. et au CPPFQ 32

Figure 15. Corrélations reliant le ratio de matière sèche des parties aériennes des plants d'épinette blanche (1+0) au cumul du nombre d'heures d'exposition au froid dans les six pépinières échantillonnées 33

Introduction

Au Québec, la dessiccation hivernale, le gel racinaire, ainsi que les gels intenses hâtifs d'automne et tardifs de printemps sont responsables de pertes considérables de plants dans les pépinières forestières. En moyenne, selon l'intensité du gel à l'échelle de la région écologique, les pertes annuelles de plants estimées par les pépiniéristes du Québec varient de 5 à 30 % dans chacune des pépinières (Colas *et al.* 2003). Dans le cadre du programme de surveillance des pépinières forestières du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs (MRNFP), des échantillonnages non exhaustifs indiquent que les pertes annuelles observées ont dépassé 5,5 millions de plants de pin et d'épinette dans les régions du Saguenay-Lac-Saint-Jean, de la Mauricie-Bois-Francs, de l'Abitibi-Témiscamingue et des Laurentides (MRN 1993). En Ontario, des suivis effectués dans la même pépinière pendant plusieurs saisons de croissance consécutives montrent que les dégâts occasionnés par le gel sont extrêmement importants et varient de 16 à 48 % (Colombo 1997).

Les principales causes de mortalité des plants peuvent être attribuées à un endurcissement insuffisant, une faible couche de neige protectrice, une baisse significative des températures de l'air en début d'automne et une augmentation subite de ces dernières suivie d'un gel au printemps. Durant l'automne, les plants s'endurcissent de façon progressive contre le gel en fonction des diminutions de photopériode et de température (Sakai et Larcher 1987, Weiser 1970). Pour une essence donnée, l'acquisition de tolérance au gel varie surtout en fonction du génotype, de l'âge et des stades de croissance du plant, des régions écologiques et des pratiques culturales (Blake *et al.* 1979, Colombo 1997, Coursolle *et al.* 1998a, Hawkins *et al.* 1996, Bannister et Neuner 2001, Johnsen et Skrøppa 2000, Macey et Arnott 1986). Bien qu'au Québec, les régions de transfert des semences et les régions d'amélioration génétique spécifiques à l'épinette blanche soient bien délimitées (Beaulieu 1996, Li *et al.* 1997), aucune évaluation approfondie sur la tolérance au gel des principales sources de semences, issues des vergers à graines et utilisées dans les programmes de reboisement, n'a été effectuée en pépinières forestières, en prenant en compte l'effet des régions écologiques.

Dans les pépinières forestières, la méthode la plus utilisée pour protéger les plants contre le gel hâtif ou tardif est l'arrosage du feuillage (Rose et Haase 1996). Ces arrosages excessifs provoquent la saturation du substrat et par conséquent, un lessivage important des éléments minéraux (Lamhamedi *et al.* 2000a, 2001, 2002, 2003). Cela peut augmenter le coût de production des plants et détériorer localement la qualité des eaux souterraines. À la mi-automne, certaines pépinières forestières du MRNFP utilisent des couvertures isolantes, constituées d'un géotextile blanc et d'un plastique résistant, pour protéger les plants (1+0) contre la dessiccation et les pluies hivernales (Lambany et Renaud 1996, 1998). Pour favoriser l'endurcissement précoce et pour contrôler la croissance des plants, différentes approches peuvent être utilisées notamment, le traitement à l'aide de jours courts et l'imposition d'un stress hydrique (Bigras *et al.* 2001, Blake *et al.* 1979, Colombo *et al.* 2001, Hawkins *et al.* 1996, Hawkins et Shewan 2000, Stowe *et al.* 2001). Malgré l'avancement de nos connaissances sur les mécanismes d'endurcissement des plants d'épinette blanche en conditions contrôlées (Bigras *et al.* 2001, Calmé *et al.* 1993, Coursolle *et al.* 1998b), les pépiniéristes ne disposent pas de seuils de tolérance au gel leur permettant de connaître le degré d'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinières forestières.

Les 24 pépinières forestières du Québec, réparties dans différentes régions écologiques (Saucier *et al.* 1998), assurent une production annuelle moyenne de 152 millions de plants (Gagnon *et al.* 2000). De par leur situation géographique, ces pépinières sont soumises à des conditions climatiques extrêmement variées, lesquelles ont un effet direct sur la croissance et l'endurcissement des plants, notamment les températures minimales et maximales, les précipitations, la photopériode, le nombre de degrés-jours de croissance, le nombre d'heures d'exposition au froid et la période de risque de gel. Les observations des pépiniéristes indiquent que les plants (1+0), produits sous tunnels non chauffés, sont d'une plus grande vulnérabilité au gel et cela dès le début de l'automne. À l'échelle opérationnelle, la connaissance préalable des températures limites de tolérance au gel en automne, pour lesquelles la survie des plants de chaque

provenance est de 100 %, sans que ceux-ci ne subissent aucun dommage, quelle que soit la région écologique, faciliterait la prise de décision du pépiniériste en matière de protection.

Pour caractériser et prédire la tolérance au gel des feuillus et des résineux, des modèles mathématiques ont été mis au point en faisant appel à des variables environnementales qui prennent en compte les dommages causés par le gel (Anisko *et al.* 1994, Timmis *et al.* 1994, Leinonen 1996, Greer *et al.* 2001). Les modèles se basent sur les processus biochimiques et physiques pour décrire l'endurcissement et le *désendurcissement* des plants. Ces modèles facilitent la compréhension et l'intégration des variables environnementales contrôlant les processus d'endurcissement, d'arrêt de croissance et de tolérance au gel. Cependant, l'élaboration et l'utilisation de ces modèles nécessitent, de la part du pépiniériste, la détermination de plusieurs paramètres et variables qui décrivent les divers processus impliqués dans la tolérance au gel, ainsi que la maîtrise de certains aspects de la modélisation. Cela rend difficile leur utilisation à l'échelle de la pépinière.

L'approche préconisée à l'échelle opérationnelle doit être rapide et doit utiliser certaines variables facilement mesurables par le pépiniériste. Ainsi, pour déterminer l'état d'endurcissement des plants, certains travaux ont montré que le ratio de matière sèche (RMS) pouvait être utilisé comme indicateur de tolérance au gel aussi bien pour les résineux que pour les feuillus (Colombo 1990, Hansen et Eriksen 1993, Binnie *et al.* 1994, Calmé *et al.* 1995, Bigras *et al.* 2001). Or, jusqu'à présent, aucune étude n'a permis de vérifier d'une part si ce ratio pouvait être corrélé avec certaines variables physiologiques de tolérance au gel des parties aériennes et des racines et, d'autre part, valider son utilisation dans des pépinières forestières situées dans des régions écologiques différentes. Étant donné que la source des semences (vergers à graines de première ou de deuxième génération) et les régies de culture ne varient pas dans chaque pépinière, nous supposons que :

- l'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière est sous le contrôle d'une séquence de conditions environnementales (nombre d'heures de froid, photopériode, température minimale) particulières à chaque région écologique, lesquelles ont un effet direct sur la cinétique de l'endurcissement des plants;

- les variations du RMS sont dépendantes du cumul du nombre d'heures d'exposition au froid et que ces deux variables pourraient être utilisées pour prédire les seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche 1+0 en pépinière forestière selon les régions écologiques.

Les objectifs de cette étude consistent à : i) déterminer l'évolution de l'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0), durant l'automne, pour chacune des six pépinières forestières représentatives des différentes régions écologiques; ii) définir un modèle mathématique qui établit le lien entre le ratio de matière sèche, comme variable dépendante, et deux variables explicatives, principalement la conductivité électrolytique de la partie aérienne et la perte en eau des racines; et iii) élaborer des seuils de tolérance au gel des racines et des parties aériennes spécifiques à l'épinette blanche (1+0) durant la saison automnale.

Chapitre premier

Matériel et méthodes

1.1 Matériel végétal

Dans chacune des six pépinières échantillons (CPPFQ, Normandin, Pampev inc., Sainte-Luce, Sargim inc. et Trécesson), les graines d'épinette blanche sont semées dès la première semaine de mai dans des récipients à parois ajourées (*IPL 25-350A*, 25 cavités par récipient, 350 cm^3 par cavité; Saint-Damien, Québec, Canada). Les cavités sont remplies d'un substrat standard (tourbe/vermiculite : 3/1, v/v), préalablement humecté. Les semences sont récoltées dans des vergers à graines et diffèrent d'une pépinière à l'autre (Tableau 1) car leur choix est déterminé en fonction des règles de déplacement des semences spécifiques à l'épinette blanche (Li *et al.* 1997). Selon les cartes écologiques du Québec (Saucier *et al.* 1998, Thibault et Hotte 1985), les six pépinières sont situées dans des régions écologiques très distinctes (Figure 1, Tableau 1). Au cours de la première saison de croissance, toutes les pépinières du Québec cultivent les plants résineux sous des tunnels en plastique non chauffés (Margolis 1987). Les variables morphologiques, le statut nutritionnel, ainsi que le bilan de la fertilisation des plants d'épinette blanche (1+0) de chaque pépinière sont déterminés vers le début du mois de novembre de la première saison de croissance (Tableau 1).

1.2 Évaluation de la tolérance au gel et dispositifs expérimentaux

Dans la présente étude, la tolérance au gel se définit comme l'état physiologique du plant pour lequel celui-ci peut tolérer des températures sous le point de congélation, sans aucun dommage apparent de ses différents organes (bourgeons, aiguilles, rameaux, tige, racines). Ainsi, l'état d'endurcissement des plants (1+0) produits dans les six pépinières a été évalué au cours de l'automne de deux saisons de croissance distinctes (1999 et 2000), à raison de trois pépinières par année. De la fin du mois d'août au début du mois de novembre, cinq échantillonnages ont été effectués dans cinq pépinières (Sainte-Luce, Pampev, CPPFQ, Sargim et Normandin) et six échantillonnages dans celle de Trécesson, la plus nordique parmi elles, selon des intervalles réguliers de deux semaines. Dans chaque pépinière, le dispositif expérimental, constitué de quatre blocs aléatoires, a été installé sous tunnel. Pour chacune des dates d'échantillonnage et chacune des pépinières, les plants ont été extirpés de deux récipients/bloc. Ces derniers ont été identifiés de façon aléatoire dès l'installation du dispositif expérimental. Pour chaque date d'échantillonnage, 200 plants (25 plants/récipient x 2 récipients/bloc x 4 blocs) en provenance de chacune des pépinières ont été utilisés afin d'évaluer l'ensemble des variables de la tolérance au gel, soit un total de 1200 plants à Trécesson et 1000 plants dans chacune des cinq autres pépinières. Les plants, une fois récoltés, ont été mis dans des sacs préalablement identifiés, placés dans une glacière et expédiés par courrier rapide à notre laboratoire situé au Complexe scientifique à Sainte-Foy (Québec). À leur arrivée, les plants ont été réfrigérés à une température constante de 4 °C. Aucun plant n'a subi de dommage apparent avant le début des tests et cela pour toutes les dates d'échantillonnage.

Un échantillon composite de plants (12 plants/bloc/pépinière) a servi à l'évaluation du ratio de matière sèche (RMS = masse sèche/masse fraîche) des parties aériennes entières des plants. Les plants restants (35 plants/bloc/pépinière) ont été placés dans des sacs de plastique, pour être par la suite, soumis à différentes températures de congélation (T_1 = -4 °C, T_2 = -8 °C, T_3 = -12 °C et T_4 = -20 °C) en utilisant un seul congélateur (Figure 2). Les plants témoins (T_0 = 4 °C) n'ont pas été soumis au traitement de congélation. Ces températures de congélation artificielle ont été simulées par un congélateur (modèle *T20RS*, Tenney environmental inc., Williamsport, PA, USA) doté d'un contrôle de programmation (modèle *Versa Tenn II*, Union, New Jersey, USA). Afin de valider le programme de température de chacune des dates d'échantillonnage et de s'assurer de l'atteinte des températures-cibles aussi bien au niveau des

Tableau 1. Caractéristiques des six pépinières et de leurs plants d'épinette blanche (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées dans des régions écologiques distinctes

	CPPFQ	Normandin	Pampev	Sainte-Luce	Sargim	Trécesson
Caractéristiques des pépinières						
Région écologique[a]	2bT	4eT	2bT	4fT	4gT	5aT
Latitude	47°02'	48°51'	46°15'	48°31'	48°10'	48°34'
Longitude	70°55'	72°32'	72°00'	68°22'	65°48'	78°08'
Degrés-jours	1220-1550	1220-1390	1660-1780	1110-1330	1220-1330	1220-1280
Indice d'aridité	75-175	100-175	100-175	100-225	75-175	100-150
Caractéristiques des plants[b]						
Provenance	V1-AUB	N0-094	V1-AUB	V1-ROB	A0-CHR	N0-075
Hauteur (cm)	7,0 ± 0,2	8,2 ± 0,2	10,2 ± 0,3	11,9 ± 0,4	5,9 ± 0,2	7,4 ± 0,2
Diamètre (mm)	1,53 ± 0,02	1,87 ± 0,04	2,51 ± 0,05	3,48 ± 0,06	2,10 ± 0,06	2,06 ± 0,05
Masse racines (mg)	130 ± 6	222 ± 12	448 ± 19	725 ± 38	258 ± 16	243 ± 11
Masse totale (mg)	519 ± 21	784 ± 37	1467 ± 55	2243 ± 94	744 ± 47	733 ± 28
Statut nutritionnel[c]						
Partie aérienne						
N (%)	2,41 ± 0,06	2,10 ± 0,05	1,50 ± 0,07	2,18 ± 0,09	2,45 ± 0,03	2,52 ± 0,03
P (%)	0,33 ± 0,01	0,21 ± 0,01	0,26 ± 0,01	0,30 ± 0,01	0,33 ± 0,01	0,28 ± 0,01
K (%)	0,76 ± 0,02	0,96 ± 0,05	0,96 ± 0,02	0,73 ± 0,02	1,35 ± 0,13	0,61 ± 0,01
Ca (%)	0,14 ± 0,00	0,14 ± 0,00	0,16 ± 0,01	0,23 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,20 ± 0,00
Mg (%)	0,13 ± 0,01	0,13 ± 0,00	0,12 ± 0,00	0,16 ± 0,00	0,13 ± 0,00	0,17 ± 0,01
Racines						
N (%)	2,32 ± 0,07	2,41 ± 0,03	1,63 ± 0,05	2,12 ± 0,13	2,38 ± 0,09	2,96 ± 0,04
P (%)	0,38 ± 0,01	0,26 ± 0,00	0,30 ± 0,01	0,34 ± 0,01	0,33 ± 0,01	0,38 ± 0,01
K (%)	0,74 ± 0,03	0,68 ± 0,01	0,60 ± 0,02	0,56 ± 0,02	0,80 ± 0,04	0,66 ± 0,01
Ca (%)	0,15 ± 0,00	0,17 ± 0,00	0,21 ± 0,01	0,24 ± 0,00	0,16 ± 0,01	0,23 ± 0,00
Mg (%)	0,15 ± 0,01	0,17 ± 0,00	0,17 ± 0,00	0,17 ± 0,01	0,22 ± 0,01	0,21 ± 0,00
Bilan de la fertilisation[d]						
N (mg/plant)	55,8	61,4	64,0	80,4	71,5	81,3
P (mg/plant)	24,0	09,7	34,8	39,3	39,2	22,2
K (mg/plant)	40,2	22,6	52,1	40,9	50,5	37,4

[a] Les régions écologiques sont tirées de SAUCIER *et al.* (1998).
[b] moyenne ± erreur standard (n = 48 échantillons).
[c] moyenne ± erreur standard (n = 4 échantillons composites, chaque échantillon composite est constitué de racines ou des parties aériennes issues de douze plants).
[d] Quantité d'éléments nutritifs utilisée par chaque pépinière lors de la première saison de croissance.

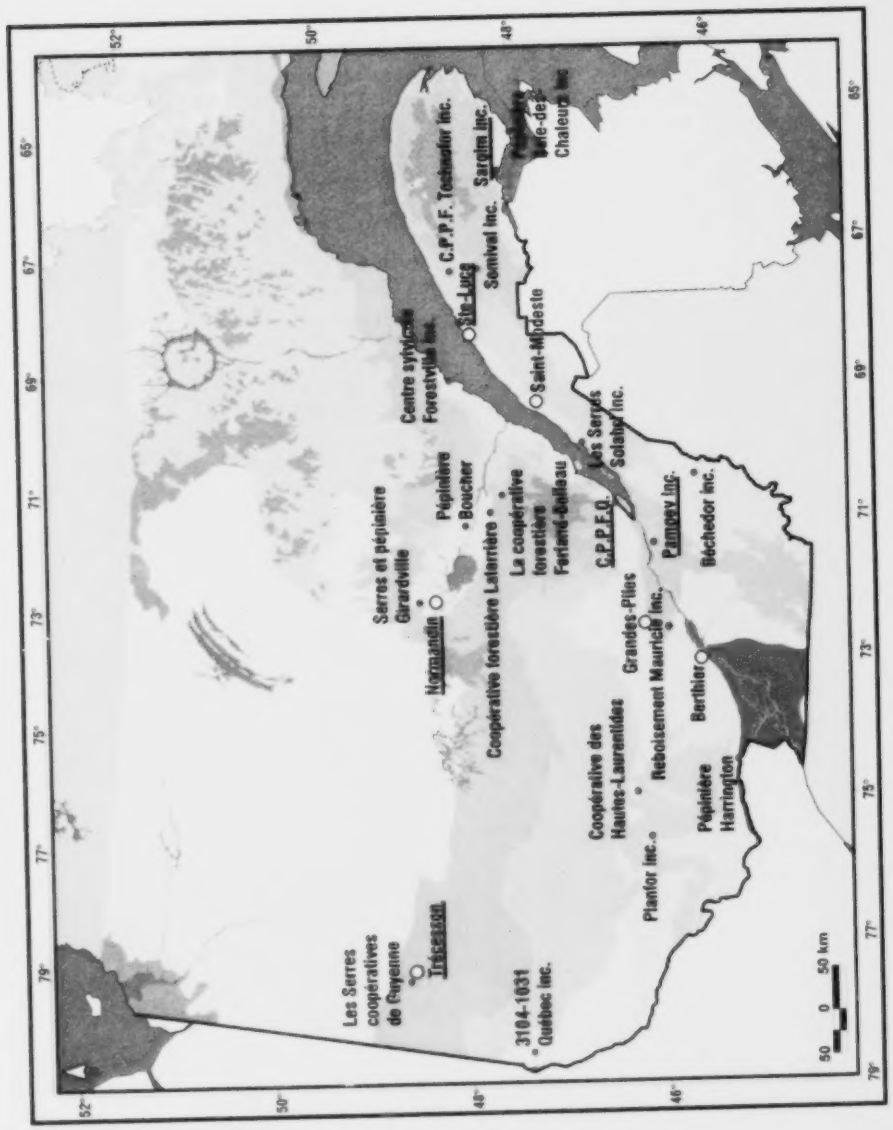

Figure 1. Répartition géographique des 24 pépinières forestières (o : 6 pépinières gouvernementales; • : 18 pépinières privées) de la province de Québec. Les six pépinières échantillonnées sont soulignées. Chaque couleur représente une région écologique (SAUCIER *et al.* 1998).

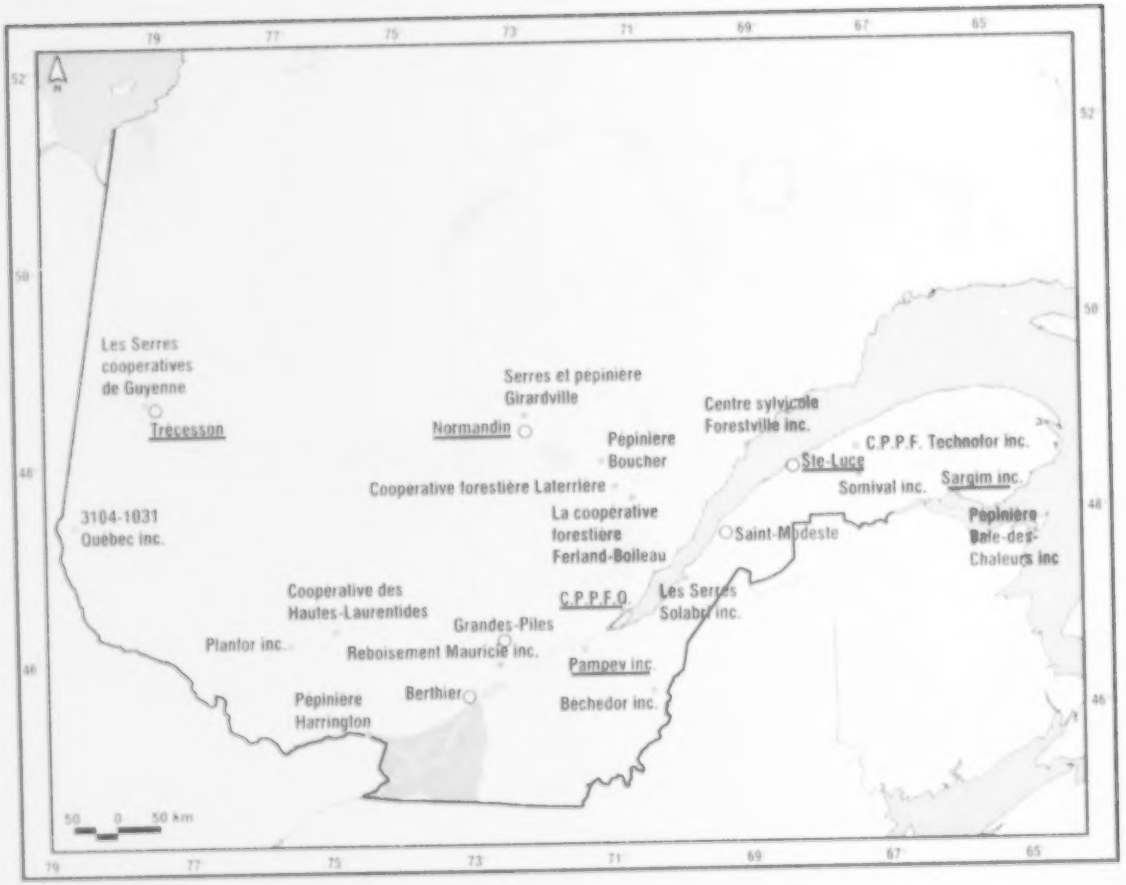

Figure 1. Répartition géographique des 24 pépinières forestières (○ : 6 pépinières gouvernementales; ● : 18 pépinières privées) de la province de Québec. Les six pépinières échantillonnées sont soulignées. Chaque couleur représente une région écologique (SAUCIER *et al.* 1998).

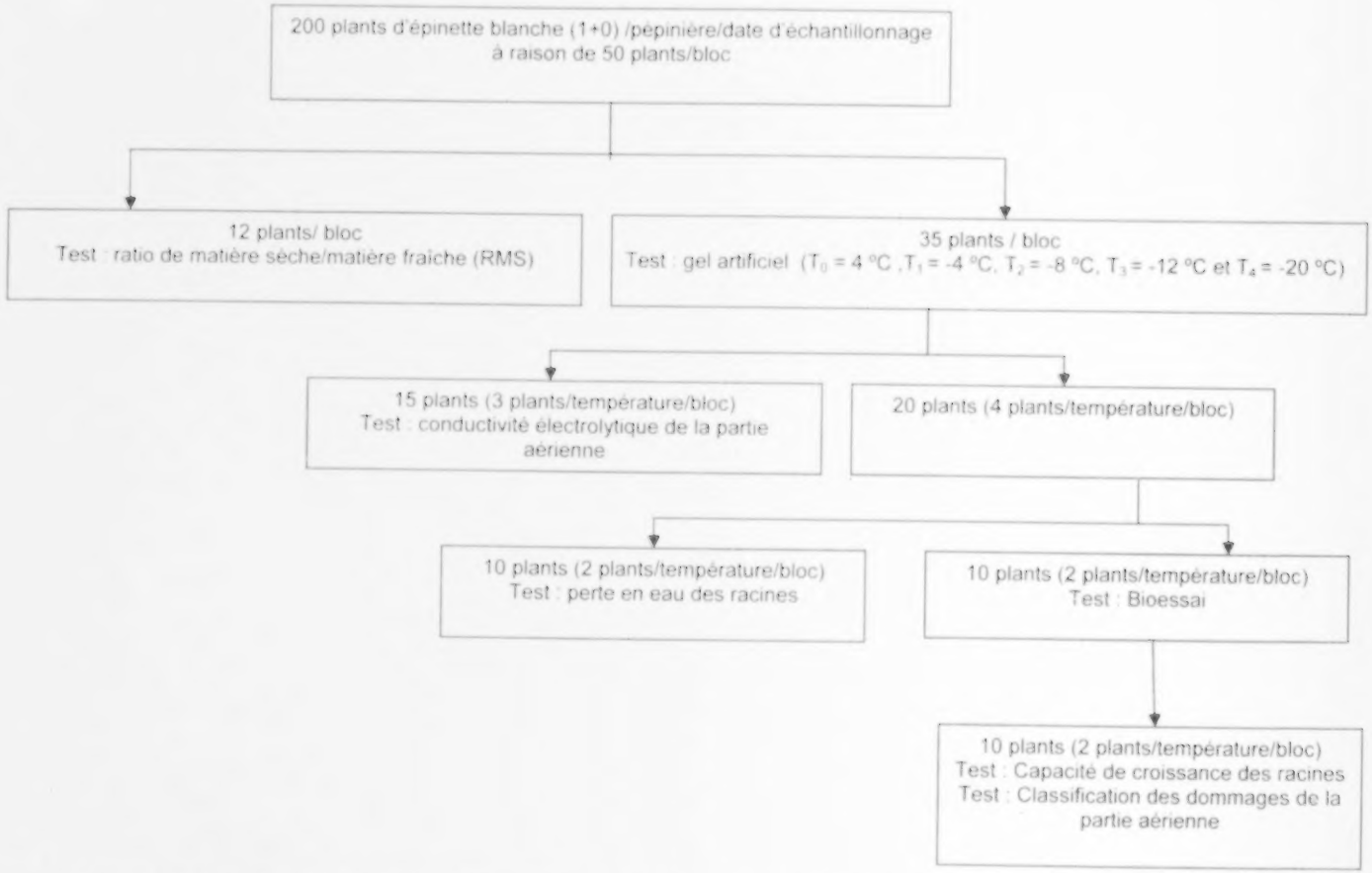

Figure 2. Modalités d'échantillonnage et évaluation des variables de tolérance au gel des plants échantillonnés dans chaque bloc, et ce pour chaque date d'échantillonnage et chacune des pépinières.

parties aériennes que des racines, deux sondes de température (modèle *107B*, Campbell Scientific [Canada] Corp., Edmonton, Alberta) ont été insérées dans des sacs de plastique distincts à l'intérieur du congélateur. Un système d'enregistrement de données (modèle *CR10X*, Campbell Scientific [Canada] Corp., Edmonton, Alberta) enregistrait les températures à toutes les trois minutes. La durée d'un cycle de congélation complet était de 29 heures, ce qui permettait d'exposer les plants à différentes températures de gel artificiel (Figure 3). La routine du cycle de congélation commençait par une stabilisation de la température des plants à 4 °C, pendant trois heures. Cette étape était suivie d'une période d'une durée de huit heures, pendant laquelle les plants étaient soumis à une température de 0 °C. Par la suite, les plants étaient soumis aux différentes températures de congélation évaluées. Lorsque la température de congélation ciblée était atteinte, elle était maintenue pendant une heure de façon constante et stable, ce qui constituait un palier (Figure 3). À la suite de l'atteinte de chaque température de congélation, selon un taux de refroidissement de 2 °C/heure (Figure 3), les plants étaient retirés et placés au réfrigérateur, à une température constante de 4 °C (Lamhamedi *et al.* 2000b).

1.2.1 Ratio de matière sèche

Pour chaque date d'échantillonnage, douze plants/bloc/pépinière, soit un total de 48 plants, sont utilisés en vue de déterminer le ratio de matière sèche (RMS = masse sèche/masse fraîche) des parties aériennes entières des plants d'épinette blanche (1+0). Les masses sèches de la partie aérienne sont mesurées par groupe de douze plants après un séchage de 48 heures à l'étuve à 60 °C (Figure 2).

1.2.2 Conductivité électrolytique et indice des dommages foliaires

La conductivité électrolytique (CE) est évaluée selon l'approche standard (Colombo *et al.* 1984, Colombo et Raitonen 1993, Lamhamedi *et al.* 2000a, b) en utilisant les parties aériennes entières des plants d'épinette blanche (1+0). La CE est déterminée sur un

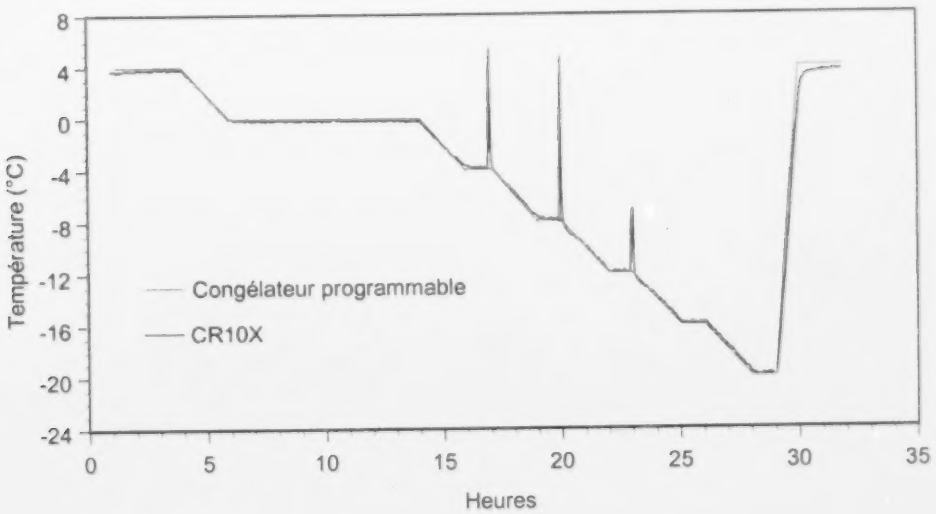

Figure 3. Exemple d'un cycle de congélation illustrant les températures à atteindre (trait en rouge), ainsi que le maintien constant de chaque température-cible sous forme d'un « palier », durant une heure. Pour confirmer l'atteinte des températures simulant les gels artificiels, un suivi continu de l'évolution de la température, à intervalle de trois minutes, a été effectué à l'aide d'un système d'enregistrement programmable (CR10X) muni de deux sondes de température (trait en bleu). Les pics indiquent l'ouverture de la porte du congélateur et coïncident avec la sortie des plants une fois que ceux-ci ont subi les différents gels artificiels ciblés (T_1 = -4 °C, T_2 = -8 °C, T_3 = -12 °C et T_4 = -20 °C).

échantillon composite constitué de trois plants, rincés au préalable trois fois à l'eau déminéralisée et placés ensuite dans des erlenmeyers de 125 ml. Pour chaque température de congélation, quatre échantillons composites sont utilisés à raison d'un échantillon composite/bloc/température. Après avoir subi les différentes températures de congélation (témoin : T_0, T_1, T_2, T_3 et T_4), les échantillons sont immergés dans 100 ml d'eau déminéralisée pendant une nuit entière à une température de 4 °C. Après saturation, la libération des électrolytes (conductivité électrolytique mesurée en µSiemens/cm) dans la solution de chaque échantillon est mesurée à l'aide d'un conductimètre (CE_1) (modèle *160, Conductivity meter*, Orion Research Inc., Boston, MA, USA). Le calibrage du conductimètre se fait à l'aide d'une solution de KCl (0,01 N) d'une conductivité de 1,411 mS/cm. Par la suite, les échantillons sont placés dans un autoclave, à une température de 121 °C, pendant 15 minutes afin de détruire toutes les cellules et favoriser la libération maximale des ions. La libération des électrolytes est remesurée (CE_2), à la suite de la saturation des tissus morts, pendant une nuit entière à une température de 4 °C. Des valeurs élevées de conductivité électrolytique relative, par rapport à celles des plants témoins, laissent présager que les dommages engendrés par le gel sont très importants. La conductivité électrolytique relative (CR) de chaque échantillon est calculée comme suit :

$$CR = \frac{CE_1}{CE_2} \times 100 \qquad [1]$$

Par la suite, l'indice des dommages foliaires (I_f), exprimé en pourcentage, est calculé en combinant les données de la conductivité électrolytique relative des plants soumis au gel, ainsi que celles des plants témoins (Colombo *et al.* 1984). Les valeurs de cet indice sont indépendantes du volume de l'échantillon et des variations saisonnières des électrolytes libres des parties aériennes lesquels peuvent être libérés en absence du gel. Un indice élevé indique une tolérance au gel faible, tandis que l'inverse signifie une tolérance au gel importante. Certains travaux ont démontré que lorsque cet indice est inférieur à 1, les plants ne montrent pas de dommage visible en réaction aux différentes températures de congélation (Jian 1992, Lamhamedi *et al.* 2000 a, b). Pour chaque température de congélation, cet indice est calculé selon l'expression suivante :

$$I_f = \frac{CR_{\text{échantillon gelé}} - CR_{\text{témoin}}}{1 - \frac{CR_{\text{témoin}}}{100}} \qquad [2]$$

i_f : Indice des dommages foliaires pour une température donnée

$CR_{\text{échantillon gelé}}$: Conductivité électrolytique relative d'un échantillon soumis à un gel d'une température donnée

$CR_{\text{témoin}}$: Conductivité électrolytique relative d'un échantillon témoin (4 °C).

1.2.3 Perte en eau des racines

Avant de commencer les tests de congélation, les racines des plants ont été légèrement secouées, de manière à enlever le substrat, et ainsi leur permettre d'être soumises aux mêmes températures de congélation que celles des parties aériennes. Le substrat a été retiré car les racines occupent un volume relativement faible par rapport à celui du substrat de chacune des cavités du récipient. La perte en eau des racines, exprimée en pourcentage, est évaluée sur un échantillon de deux plants/température/bloc, soit huit plants par température de congélation (Figure 2). L'évaluation est effectuée par une différence de pesées, selon la procédure décrite par Ritchie (1990) et Lamhamedi *et al.* (2000b) qui utilisent la chambre à pression (PMS Instruments Co., Corvallis, OR, USA).

1.2.4 Capacité de croissance des racines et évaluation des dommages de la partie aérienne

Afin d'évaluer la physiologie des plants et l'ampleur des dommages causés par les différentes températures de gel artificiel, un échantillon de deux plants, issus de chaque bloc de chacun des traitements de congélation, a été rempoté dans des pots (volume 1,4 litres) remplis d'un mélange standard de tourbe et de vermiculite (ratio v/v : 3/1) humecté, soit un total de huit plants par température. Une fois les températures spécifiques atteintes des différents traitements de gel artificiel et après une période d'acclimatation à 4 °C, les plants sont mis en serre et répartis de façon aléatoire dans quatre blocs. Les températures diurnes et nocturnes sont maintenues respectivement à 25 et 18 °C, (± 2 °C). La photopériode est fixée à 18 heures grâce à une lumière d'appoint fournie par des lampes de sodium à haute pression de 400 W (Lumiponic inc.,

Montréal, Canada). Au besoin, des arrosages d'appoint sont effectués pendant la durée du bioessai, sans apport de fertilisants. Après 21 jours en serre et sans recourir au lavage du système racinaire, le nombre de nouvelles racines blanches (≥ 1cm) de chaque plant est évalué en fonction des températures de congélation. Par la suite, l'évaluation des dommages de la partie aérienne est effectuée en utilisant l'indice de JIAN (1992) dont l'échelle comprend cinq classes de dommages de 0 à 5 (Classe 0 : aucun dommage à la partie aérienne; Classe 1 : moins de 20 % d'aiguilles brunies ou rougies; Classe 2 : 21-50 % d'aiguilles rougies ou brunies; Classe 3 : 51-90 % d'aiguilles rougies ou brunies, bourgeon terminal mort; Classe 4 : bourgeon terminal mort, la plus grande partie de la tige principale et quelques branches latérales mortes, quelques branches latérales ou aiguilles vivantes; Classe 5 : partie aérienne complètement morte, aucun tissu vivant).

1.3 Variables environnementales

Les températures de l'air, à la base des plants et au niveau de la rhizosphère ont été enregistrées dans chacune des six pépinières, d'une façon continue par un système d'enregistrement de données (modèle CR10X, Campbell Scientific (Canada) Corp., Edmonton, Alberta), à intervalles réguliers de quinze minutes. La sommation des basses températures durant la période d'échantillonnage est calculée selon le cumul du nombre d'heures d'exposition au froid enregistrées à la base des plants d'épinette blanche (1+0). Les heures d'exposition au froid sont cumulées aussitôt que la température de référence à 5 °C est dépassée, ce qui favorise l'endurcissement des plants (PERRY 1971, LAMBANY 1994).

Ainsi, le cumul du nombre d'heures d'exposition au froid (n) est calculé comme suit :

$$n = \sum_{j} \sum_{i=1}^{i=24} (Tr - Th), \text{ avec } (Tr - Th) > 0$$

Tr : température de référence (= 5 °C)
Th : température horaire enregistrée (°C)
i : heure de la journée (1 jour = 24 heures)
j : jour julien dont la période d'évaluation s'est étalée de la fin d'août jusqu'au début novembre

1.4 Analyses statistiques

Afin de mieux préciser la cinétique d'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0), une analyse de la variance a été effectuée pour chaque pépinière puisque l'objectif n'était pas de comparer l'état d'endurcissement des plants des différentes sources de semences. Pour mieux caractériser l'évolution des seuils de tolérance au gel des plants durant l'automne, des comparaisons multiples des moyennes ont été effectuées entre les températures de congélation par date d'échantillonnage et entre les dates d'échantillonnage par température de congélation.

Lors des différents traitements de gel artificiel, les plants doivent être conservés à l'intérieur du congélateur et en être sortis qu'une fois la température-cible est atteinte. Cela signifie qu'aucune randomisation n'a été effectuée, au moment de l'application des différents traitements de congélation (4, -4, -8, -12 et -20 °C), pour évaluer le pourcentage de la perte en eau (PPE) des racines et la conductivité électrolytique (CE) des parties aériennes des plants. Ainsi, le modèle statistique retenu est un *strip-plot*, aussi connu sous le nom de *split-block* (BERNIER-CARDOU et BIGRAS 2001, MILLIKEN et JOHNSON 1984). Le modèle s'écrit donc :

$$y_{(ijkl)} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_k + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \xi_{(ijkl)} \quad [1]$$

où i = 1, ...,4
j = six dates d'échantillonnage pour la pépinière de Trécesson
j = cinq dates d'échantillonnage pour les autres pépinières
k = 4, -4, -8, -12 et -20 °C
l = 1 (conductivité électrolytique)
l = 1, 2 (pour le pourcentage de perte en eau car deux plants par répétition sont utilisés)

$y_{(ijkl)}$: valeur observée du pourcentage de perte en eau ou de la conductivité électrolytique
μ : moyenne générale
τ_i : effet du i e bloc
β_j : effet de la j e date
$(\tau\beta)_{ij}$: interaction entre le i e bloc et la j e date
γ_k : effet du k e traitement de congélation
$(\tau\gamma)_{ik}$: interaction entre le i e bloc et le k e traitement de congélation
$(\beta\gamma)_{jk}$: interaction entre la j e date et le k e traitement de congélation
$\xi_{(ijkl)}$: terme d'erreur entre le i e bloc, la j e date, le k e traitement de congélation et le l e plant

Les facteurs *date* et *traitement* sont des effets fixes, tandis que le facteur *bloc* est un effet aléatoire. Aussi, ce modèle d'analyse de la variance a comme postulat de base que les erreurs expérimentales, ε_{ijk}, suivent une loi normale de moyenne zéro et de variance commune σ^2_ε et que les variances des résidus sont homogènes. Lorsque l'interaction entre la date d'échantillonnage et le traitement était significative, les comparaisons entre les traitements de congélation étaient effectuées pour chacune des dates afin de mieux préciser la progression graduelle de l'endurcissement des plants selon les températures de gel évaluées. Les comparaisons multiples des moyennes entre les températures de congélation par date d'échantillonnage et entre les dates d'échantillonnage par température de congélation ont été effectuées à l'aide de la méthode de Tukey (MILLER 1981). Les analyses statistiques ont été faites à l'aide du logiciel SAS (SAS Institute, Cary, CN).

Des régressions multiples ont été déterminées à l'aide de la procédure REG de SAS en vue de démontrer que le ratio de matière sèche était corrélé à la conductivité électrolytique de la partie aérienne et à la perte en eau des racines. Après avoir comparé les valeurs de R^2 et des seuils des paramètres, vérifié les hypothèses d'homogénéité des variances et de normalité pour tous ces modèles, nous avons sélectionné la transformation qui donnait le meilleur résultat dans le plus grand nombre de cas possibles. Le ratio de matière sèche (RMS) a été ensuite relié à la conductivité électrolytique relative (CR) et au pourcentage de perte en eau des racines (PPE) selon le modèle hyperbolique suivant :

$$RMS = 1 / (\beta_0 + \beta_1 PPE + \beta_2 CR) \qquad [2]$$

Pour mieux évaluer l'effet des différentes températures de gel artificiel sur l'apparition de nouvelles racines, nous avons établi la relation entre la capacité de croissance racinaire (CCR), exprimée par le nombre de nouvelles racines blanches, et le pourcentage de perte en eau des racines. Le nombre de nouvelles racines est une variable aléatoire qui suit vraisemblablement la loi de Poisson. Les modèles mathématiques ont été construits à l'aide de la procédure GENMOD de SAS.

Pour chaque date d'échantillonnage, la CCR est fortement corrélée au pourcentage de perte en eau des racines selon une fonction exponentielle négative suivante :

$$CCR = e^{(\beta_0 + \beta_1 PPE)} \qquad [3]$$

β_0 et β_1 sont des constantes.

Par la suite, nous avons testé si les paramètres du modèle [3] différaient de façon significative, d'une date à l'autre, pour chaque pépinière. Pour ce faire, nous avons retenu un modèle complet comprenant quatre variables indicatrices (x_i, avec i = 1, 2, 3 et 4). Voici ces variables dans les cas où il n'y a que cinq dates d'échantillonnage, c'est-à-dire pour les pépinières de Sainte-Luce, Pampev, CPPFQ, Sargim et Normandin. Notons que le principe est le même pour la pépinière de Trécesson, sauf qu'il y a une variable indicatrice supplémentaire.

$$X_1 = \begin{cases} 1, & \text{si la date est le 13 septembre} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$X_2 = \begin{cases} 1, & \text{si la date est le 27 septembre} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$X_3 = \begin{cases} 1, & \text{si la date est le 12 octobre} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$X_4 = \begin{cases} 1, & \text{si la date est le 25 octobre} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Le modèle retenu pour tester l'égalité des paramètres est donc :

$$CCR = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 PPE + \beta_6 x_1 PPE + \beta_7 x_2 PPE + \beta_8 x_3 PPE + \beta_9 x_4 PPE) \qquad [4]$$

En testant si les paramètres β_0 à β_4 et β_6 à β_9 sont différents de zéro, on vérifie s'ils sont significativement différents d'une date à l'autre. Cela nous offre les possibilités d'utiliser un modèle général ou un modèle spécifique à chaque date.

1.5 Détermination des seuils de tolérance au gel

La détermination des seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche (1+0) repose sur la combinaison des résultats obtenus des tests directs (capacité de croissance des racines et indice de Jian) et indirects (RMS, conductivité électrolytique, indice des dommages foliaires et perte en eau des racines) d'évaluation du degré d'endurcissement des plants.

Ces seuils de tolérance au gel sont déterminés de façon à ce qu'aucun organe du plant ne soit endommagé, aux différentes températures de gel évaluées (-4, -8, -12 et -20 °C), tout en assurant une excellente reprise et un taux de survie des plants de 100 %. Les modèles mathématiques hyperboliques significatifs, reliant le ratio de matière sèche (RMS) aux variables les plus utilisées en matière d'évaluation de la tolérance au gel des plants, plus particulièrement la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne et le pourcentage de perte en eau des racines, démontrent clairement que nous pourrons utiliser la variable dépendante, c'est-à-dire le RMS, comme variable de prédiction de tolérance au gel en automne. De plus, après avoir vérifié la robustesse du modèle qui relie le RMS de la partie aérienne au cumul du nombre d'heures d'exposition au froid, les pépiniéristes qui possèdent des enregistrements fiables des températures peuvent utiliser le cumul du nombre d'heures d'exposition au froid comme une deuxième variable de prédiction des seuils de tolérance au gel.

Chapitre deux

Résultats

2.1 Variables environnementales

Les variables environnementales ont été enregistrées, sous des conditions de tunnel de six pépinières forestières, durant l'automne de la première saison de croissance des plants d'épinette blanche (1+0). L'évolution des différentes températures maximales, minimales et moyennes, notamment celles de la rhizosphère, à la base des plants et à 2 m est illustrée aux figures 4 et 5. Les variations de ces différentes températures sont dissemblables d'une pépinière à l'autre et dépendent de la région écologique et de la situation géographique où celles-ci se trouvent. Les températures minimales (< 0 °C) de l'air et à la base des plants d'épinette blanche (1+0) ont été observées dès le début d'octobre alors que celles au niveau de la rhizosphère, à l'exception faite des pépinières de Sargim et du CPPFQ, n'ont été observées que vers le début du mois de novembre.

Les variations de températures minimales à la base des plants ont modifié l'évolution du nombre d'heures d'exposition des plants au froid (Figures 6 a, b) entre les pépinières échantillonnées. En effet, pour la même période d'échantillonnage, les pépinières les plus nordiques (Trécesson et Normandin) ont été exposées au froid pendant un nombre d'heures plus élevé que les autres pépinières (Pampev, Sainte-Luce, CPPFQ et Sargim). En 1999, vers la mi-octobre, les pépinières de Trécesson, de Pampev et de Sainte-Luce ont été exposées respectivement au froid pendant 165, 115 et 110 heures de froid (HF) alors que vers le début du mois de novembre, le nombre d'heures d'exposition au froid atteignait respectivement 609, 408 et 474 HF (Figure 6a). En 2000, vers la mi-octobre, les pépinières de Normandin, du CPPFQ et de Sargim ont été exposées respectivement au froid pendant 216, 154 et 115 HF, alors que vers le début du mois de novembre, les expositions atteignaient respectivement 615, 483 et 432 HF (Figure 6b).

2.2 Tolérance au gel

Pour caractériser le degré d'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0) dans chacune des pépinières, nous avons effectué des analyses de la variance et des comparaisons multiples des moyennes entre les différentes températures, tout en simulant le gel artificiel, afin de connaître leurs effets sur les différentes variables d'évaluation de la tolérance au gel.

2.2.1 Conductivité électrolytique et indice de dommages des parties aériennes

Dans chacune des pépinières, la température de congélation et la date d'échantillonnage ont influencé de façon significative la conductivité électrolytique ($p < 0,0001$). L'interaction température*date est significative ($p < 0,0001$) et indique que l'état d'endurcissement des parties aériennes varie selon la date d'échantillonnage. Les comparaisons multiples des traitements de congélation par date d'échantillonnage n'indiquent aucune différence entre la conductivité électrolytique relative des parties aériennes des plants soumis à un gel artificiel de -4 °C et celle des plants témoins (4 °C) (Figure 7, Tableau 2). Du point de vue de leurs effets sur la conductivité électrolytique relative, les différences les plus marquées entre les autres températures de congélation (-8, -12 et -20 °C), sont les plus apparentes au début de l'échantillonnage et vers la fin du mois de septembre (Figure 7, Tableau 2). À l'inverse de cette dernière période, pendant la période fin octobre – début novembre, en général, les conductivités électrolytiques relatives, entre les traitements de congélation, ne diffèrent pas de manière significative dans chacune des six pépinières.

Les comparaisons multiples des dates d'échantillonnage par traitement de congélation révèlent que les conductivités électrolytiques des plants témoins (4 °C) et du traitement de congélation (-4 °C) sont relativement identiques entre elles, du début à la fin des essais

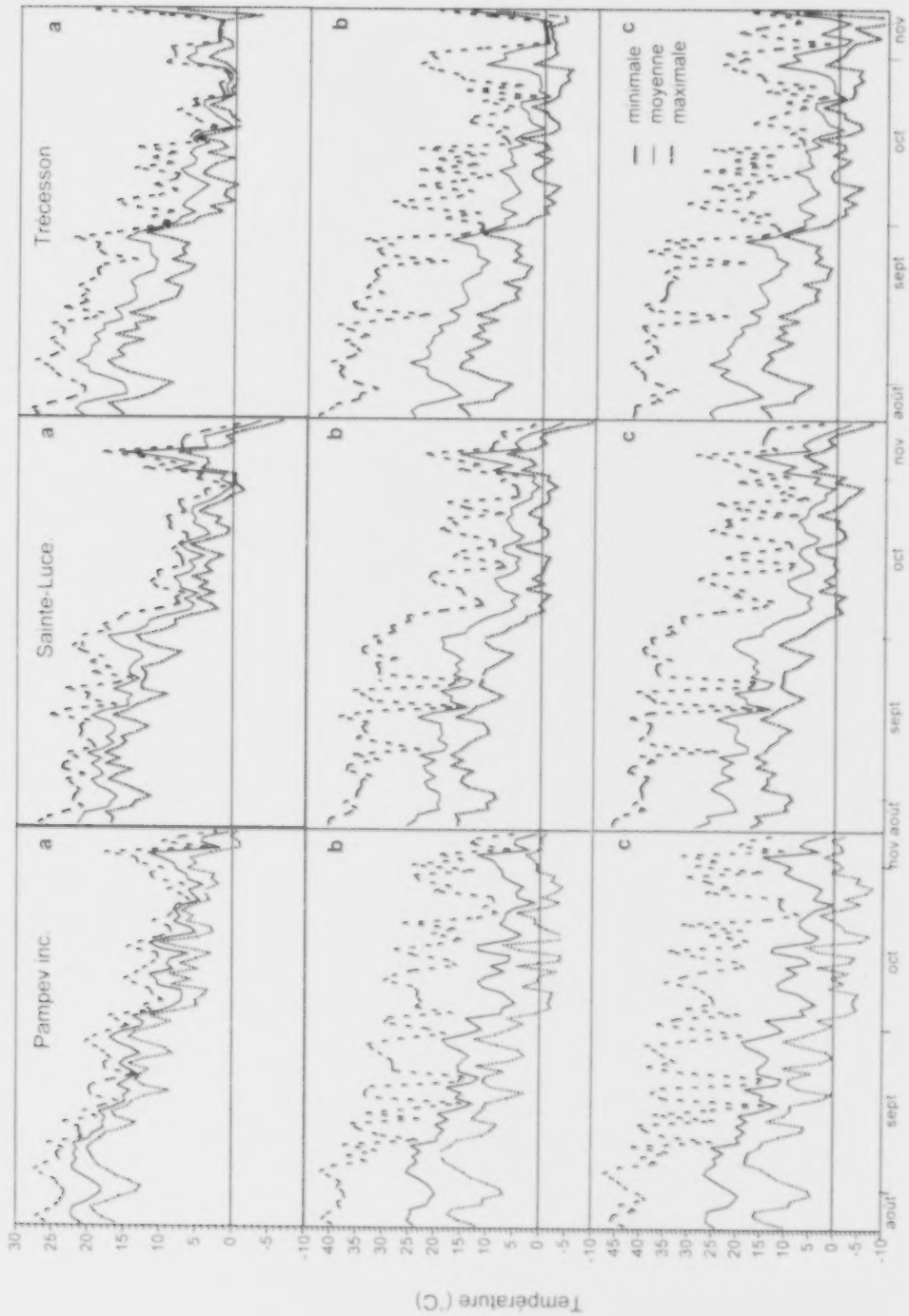

Figure 4 Variations des températures quotidiennes maximales, moyennes et minimales dans la rhizosphère (**a**), à la base des plants (**b**) et à 2 m (**c**), sous tunnel, lors de l'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0) produits dans trois pépinières forestières (Trécesson, Sainte-Luce et Pampev) durant l'automne 1999.

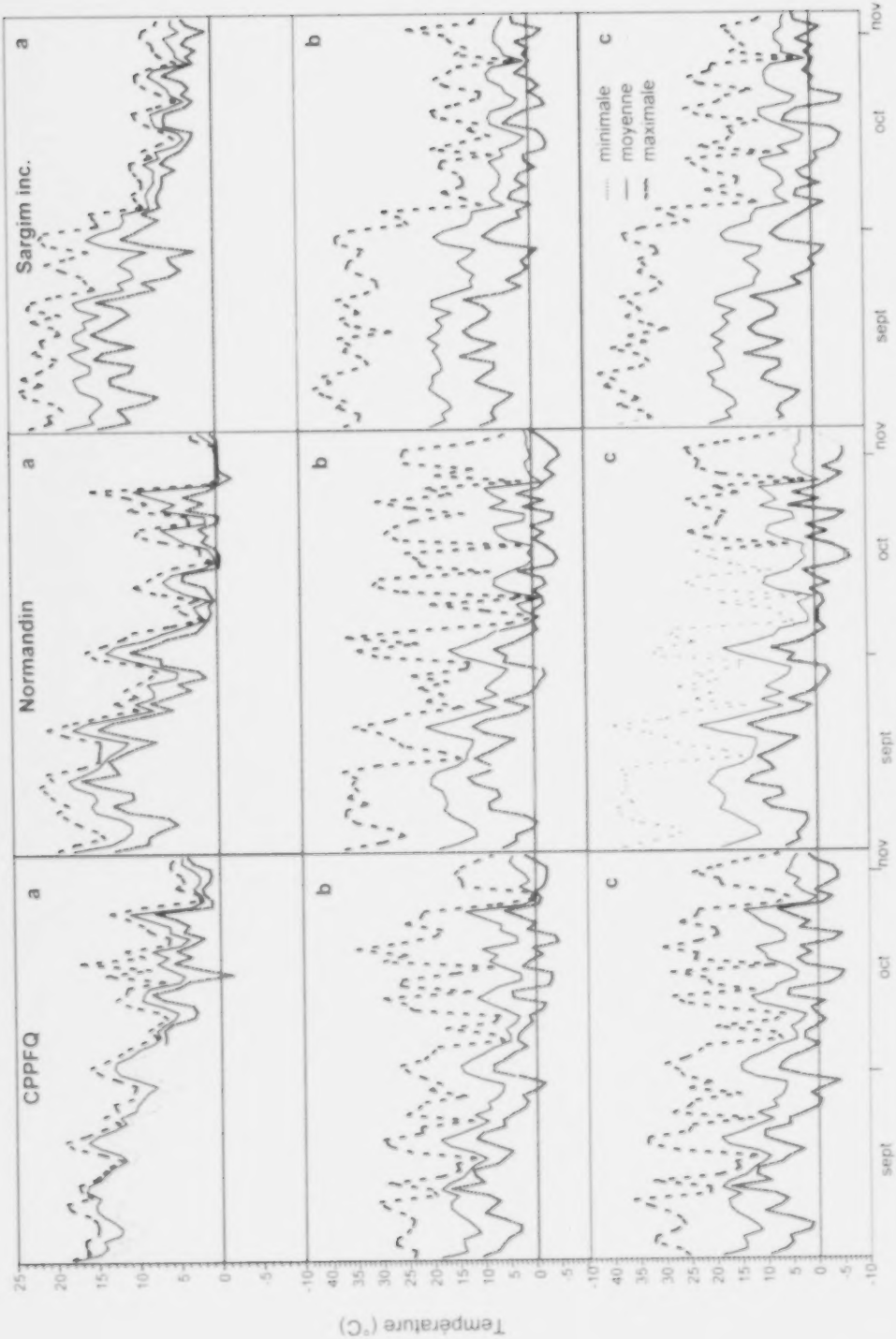

Figure 5. Variations des températures quotidiennes maximales, moyennes et minimales dans la rhizosphère (**a**), à la base des plants (**b**) et à 2 m (**c**), sous tunnel, lors de l'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0) produits dans trois pépinières forestières (CPPFQ, Sargim et Normandin) durant l'automne 2000

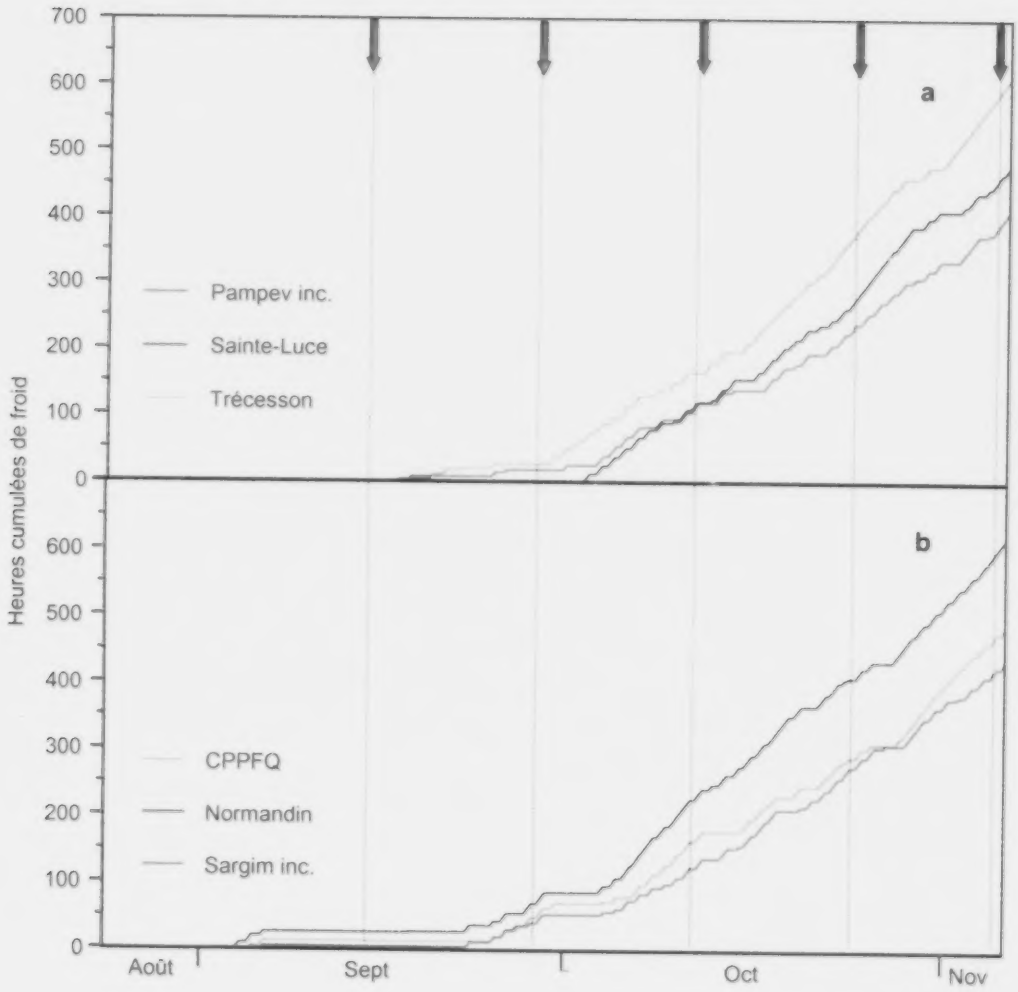

Figure 6. Cumul du nombre d'heures d'exposition au froid à la base des plants d'épinette blanche (1+0) dans différentes pépinières forestières durant l'automne (a) 1999 et (b) 2000. Les flèches en vert indiquent les dates d'échantillonnage.

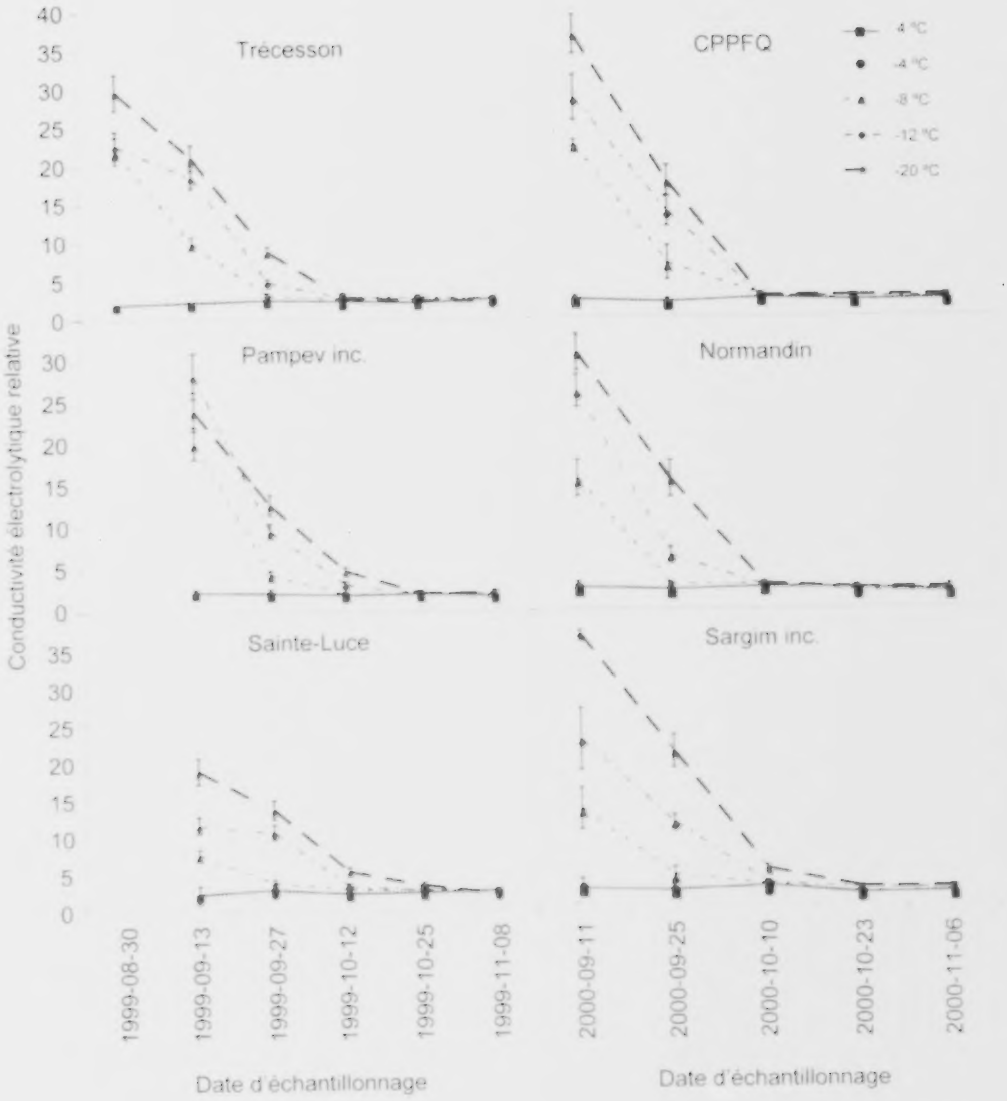

Figure 7. Variations de la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (1+0) durant l'automne, en fonction des températures de congélation dans les six pépinières forestières.

Tableau 2. Comparaisons multiples des moyennes de la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne entière des plants d'épinette blanche (1+0) entre les températures de congélation, par date d'échantillonnage

Pépinière	Date	Températures de congélation (gel artificiel)				
		T_0 = 4 °C	T_1 = -4 °C	T_2 = -8 °C	T_3 =-12 °C	T_4 =-20 °C
Pampev	13-09-99	2,246 **a***	2,304 **a**	20,126 **b**	28,243 **b**	23,959 **b**
	27-09-99	2,020 **a**	2,307 **a**	4,334 **b**	9,526 **c**	12,678 **c**
	12-10-99	1,856 **ab**	1,815 **a**	1,934 **ab**	3,095 **bc**	4,702 **c**
	25-10-99	1,869 **a**	1,992 **a**	2,052 **a**	1,965 **a**	2,045 **a**
	08-11-99	1,686 **a**	1,722 **a**	2,037 **a**	2,114 **a**	2,030 **a**
Sainte-Luce	13-09-99	1,951 **a**	1,863 **a**	7,340 **b**	11,291 **bc**	18,586 **c**
	27-09-99	2,506 **a**	2,262 **a**	3,518 **a**	10,277 **b**	13,313 **b**
	12-10-99	1,909 **a**	2,187 **a**	2,572 **a**	2,945 **ab**	4,959 **b**
	25-10-99	1,996 **a**	2,275 **a**	2,541 **a**	2,412 **a**	3,016 **a**
	08-11-99	2,284 **a**	1,953 **a**	2,248 **a**	2,253 **a**	1,867 **a**
Trécesson	30-08-99	1,945 **a**	2,145 **a**	22,030 **b**	22,727 **b**	29,656 **b**
	13-09-99	2,219 **a**	2,145 **a**	9,873 **b**	18,535 **c**	21,076 **c**
	27-09-99	2,401 **a**	2,560 **a**	3,079 **ab**	4,774 **b**	8,687 **c**
	12-10-99	2,244 **a**	2,363 **a**	2,591 **a**	2,798 **a**	2,753 **a**
	25-10-99	2,041 **a**	2,253 **a**	2,500 **a**	2,731 **a**	2,264 **a**
	08-11-99	2,439 **a**	2,175 **a**	2,574 **a**	2,576 **a**	2,313 **a**
CPPFQ	11-09-00	2,265 **a**	2,513 **a**	22,610 **b**	28,600 **bc**	36,853 **c**
	25-09-00	1,830 **a**	2,018 **a**	6,933 **b**	13,688 **c**	17,608 **c**
	10-10-00	2,343 **a**	2,313 **a**	2,778 **a**	2,470 **a**	2,635 **a**
	23-10-00	1,965 **a**	2,035 **a**	1,990 **a**	2,500 **a**	2,583 **a**
	06-11-00	2,148 **a**	2,020 **a**	2,188 **a**	2,310 **a**	2,620 **a**
Normandin	11-09-00	2,528 **a**	3,008 **a**	15,710 **b**	26,208 **c**	30,793 **c**
	25-09-00	2,228 **a**	2,350 **a**	2,893 **a**	6,373 **b**	15,560 **c**
	10-10-00	2,518 **a**	2,450 **a**	2,958 **a**	2,668 **a**	2,885 **a**
	23-10-00	2,300 **a**	1,975 **a**	2,113 **a**	2,418 **a**	2,335 **a**
	06-11-00	1,860 **a**	1,968 **a**	1,853 **a**	2,078 **a**	2,350 **a**
Sargim	11-09-00	2,483 **a**	3,145 **a**	13,298 **b**	22,633 **c**	36,800 **d**
	25-09-00	2,148 **a**	2,573 **a**	4,343 **b**	11,330 **c**	20,888 **d**
	10-10-00	2,645 **a**	2,390 **a**	2,898 **a**	3,058 **a**	5,033 **b**
	23-10-00	1,685 **a**	1,588 **a**	1,775 **a**	2,385 **a**	2,460 **a**
	06-11-00	1,738 **a**	1,993 **a**	1,860 **a**	2,333 **a**	2,415 **a**

* Horizontalement, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil α = 5 %, selon la méthode de Tukey.

et ce, pour toutes les pépinières. Pour les autres températures (-8, -12 et -20 °C), les différences sont significativement très marquées entre les valeurs de conductivité très élevées lors des premières dates d'échantillonnage en comparaison de celles des dernières dates d'échantillonnage (Tableau 3).

Dans chacune des pépinières, les indices de dommages des plants soumis à -4 °C, ainsi que celui des plants témoins (4 °C) sont inférieurs à 1 ($I_t < 1$), et ce pour toutes les dates d'échantillonnage (Figure 8). Par contre, pour les échantillonnages effectués lors du mois de septembre, les indices de dommages relatifs aux températures -8, -12 et -20 °C sont supérieurs à 1. Pour ces dernières températures, l'indice des dommages n'est devenu inférieur à 1 que vers le début du mois d'octobre.

2.2.2 Perte en eau des racines

Dans chacune des pépinières, la température de congélation et la date d'échantillonnage ont modifié de manière significative ($p < 0,0001$) le pourcentage de perte en eau des racines. L'interaction température*date est significative ($p < 0,0001$) et indique que l'état d'endurcissement des racines n'est pas identique d'une date à l'autre.

Les comparaisons multiples des traitements de congélation par date montrent qu'il n'existe aucune différence significative dans les pourcentages de perte en eau des racines entre le traitement témoin (4 °C) et le traitement de congélation (-4 °C) au cours des deux automnes, quelle que soit la pépinière (Figure 9, Tableau 4). En 1999, dès la fin du mois de septembre, les traitements de congélation (4, -4 et -8 °C) ne différaient pas significativement en ce qui concerne leurs effets sur les pourcentages de perte en eau des racines, dans chacune des trois pépinières (Trécesson, Pampev et Sainte-Luce). Par contre, en automne 2000, l'absence de différences significatives entre ces trois traitements dans les trois autres pépinières (Sargim, Normandin et CPPFQ) n'a été observée que vers la fin du mois d'octobre. Cependant, les différences observées lors de la première date d'échantillonnage entre les différents traitements de congélation se sont estompées dès le début du mois de novembre dans toutes les pépinières forestières (Figure 9, Tableau 4).

Les comparaisons multiples des dates par traitement de congélation montrent des variations très significatives des pourcentages de perte en eau des racines, en automne (Tableau 5). En effet, les comparaisons des moyennes spécifiques aux traitements de congélation (-8, -12 et -20 °C) révèlent que les pourcentages de perte en eau des racines ont significativement diminué entre le début septembre et le début novembre.

2.2.3 Capacité de croissance des racines (CCR) en relation avec leur pourcentage de perte en eau

Dans chacune des pépinières et cela pour toutes les dates d'échantillonnage, le traitement témoin (4 °C) et celui de -4 °C ne diffèrent pas de façon significative l'un de l'autre quant à leurs effets sur l'initiation de nouvelles racines et l'apparition de dommages foliaires (Figures 10 et 11a-c). Par contre, la production de nouvelles racines est significativement supérieure pour ces deux traitements par rapport aux autres traitements de congélation (-8, -12 et -20 °C), à l'exception de la dernière date d'échantillonnage. Dans ce dernier cas, l'apparition de nouvelles racines était généralement semblable entre le traitement témoin et les températures de congélation -4, -8 et -12 °C (Figure 10).

La capacité de croissance des racines (CCR), mesurée par le nombre de nouvelles racines blanches, est fortement corrélée négativement au pourcentage de perte en eau des racines. Pour chaque date d'échantillonnage, cette relation s'ajuste à une fonction exponentielle, soit :

$$CCR = e^{(\beta_0 + \beta_1 PPE)}$$

Le paramètre β_1 (toujours < 0) associé au pourcentage de perte en eau (PPE) est significatif au seuil de 5 %. Ce paramètre reflète la baisse de la capacité de croissance des racines, par unité de pourcentage de perte en eau des racines, au fur et à mesure que l'intensité du gel augmente. Ce paramètre varie entre -0,10 et -0,65 en fonction de la pépinière et de la date d'échantillonnage. Le paramètre β_0 exprime la capacité de croissance des racines lorsque la perte en eau des racines est presque nulle.

Tableau 3. Comparaisons multiples des moyennes de la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne entière des plants d'épinette blanche (1+0) entre les dates d'échantillonnage, par température de congélation

Température (gel artificiel)	Dates d'échantillonnages 30-08-99	13-09-99	27-09-99	12-10-99	25-10-99	08-11-99
			Pampev			
T_0 = 4 °C		2,246 a*	2,020 a	1,856 a	1,869 a	1,686 a
T_1 = -4 °C		2,304 a	2,317 a	1,815 a	1,992 a	1,722 a
T_2 = -8 °C		20,126 a	4,334 b	1,934 c	2,052 c	2,037 c
T_3 = -12 °C		28,242 a	9,526 b	3,095 c	1,965 c	2,114 c
T_4 = -20 °C		23,959 a	12,678 b	4,703 c	2,045 d	2,030 d
			Sainte-Luce			
T_0 = 4 °C		1,951 a	2,506 a	1,909 a	1,996 a	2,284 a
T_1 = -4 °C		1,863 a	2,262 a	2,187 a	2,275 a	1,953 a
T_2 = -8 °C		7,340 a	3,518 b	2,572 b	2,541 b	2,248 b
T_3 = -12 °C		11,291 a	10,277 a	2,945 b	2,412 b	2,253 b
T_4 = -20 °C		18,586 a	13,313 a	4,959 b	3,016 bc	1,867 c
			Trécesson			
T_0 = 4 °C	1,948 a	2,219 a	2,401 a	2,244 a	2,041 a	2,439 a
T_1 = -4 °C	2,145 a	2,145 a	2,560 a	2,363 a	2,253 a	2,175 a
T_2 = -8 °C	22,030 a	9,873 b	3,079 c	2,591 c	2,499 c	2,574 c
T_3 = -12 °C	22,727 a	18,535 a	4,774 b	2,798 c	2,731 c	2,576 c
T_4 = -20 °C	29,656 a	21,076 a	8,687 b	2,753 c	2,264 c	2,313 c

	Dates d'échantillonnages 11-09-00	25-09-00	10-10-00	23-10-00	06-11-00
		CPPFQ			
T_0 = 4 °C	2,265 a	1,830 a	2,343 a	1,965 a	2,148 a
T_1 = -4 °C	2,513 a	2,018 a	2,313 a	2,035 a	2,020 a
T_2 = -8 °C	22,610 a	6,933 b	2,778 c	1,990 c	2,188 c
T_3 = -12 °C	28,600 a	13,688 b	2,470 c	2,500 c	2,310 c
T_4 = -20 °C	36,853 a	17,608 b	2,635 c	2,583 c	2,620 c
		Normandin			
T_0 = 4 °C	2,528 a	2,228 a	2,518 a	2,300 a	1,860 a
T_1 = -4 °C	3,008 a	2,350 ab	2,450 ab	1,975 b	1,968 b
T_2 = -8 °C	15,710 a	2,893 b	2,958 b	2,113 bc	1,853 c
T_3 = -12 °C	26,208 a	6,373 b	2,668 c	2,418 c	2,078 c
T_4 = -20 °C	30,793 a	15,560 b	2,885 c	2,335 c	2,350 c
		Sargim			
T_0 = 4 °C	2,483 a	2,148 a	2,645 a	1,685 a	1,738 a
T_1 = -4 °C	3,145 a	2,573 ab	2,390 ab	1,588 b	1,993 ab
T_2 = -8 °C	13,298 a	4,343 b	2,898 bc	1,775 d	1,860 cd
T_3 = -12 °C	22,633 a	11,330 b	3,058 c	2,385 c	2,333 c
T_4 = -20 °C	36,800 a	20,888 b	5,033 c	2,460 d	2,415 d

* Horizontalement, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil α = 5 %, selon la méthode de Tukey.

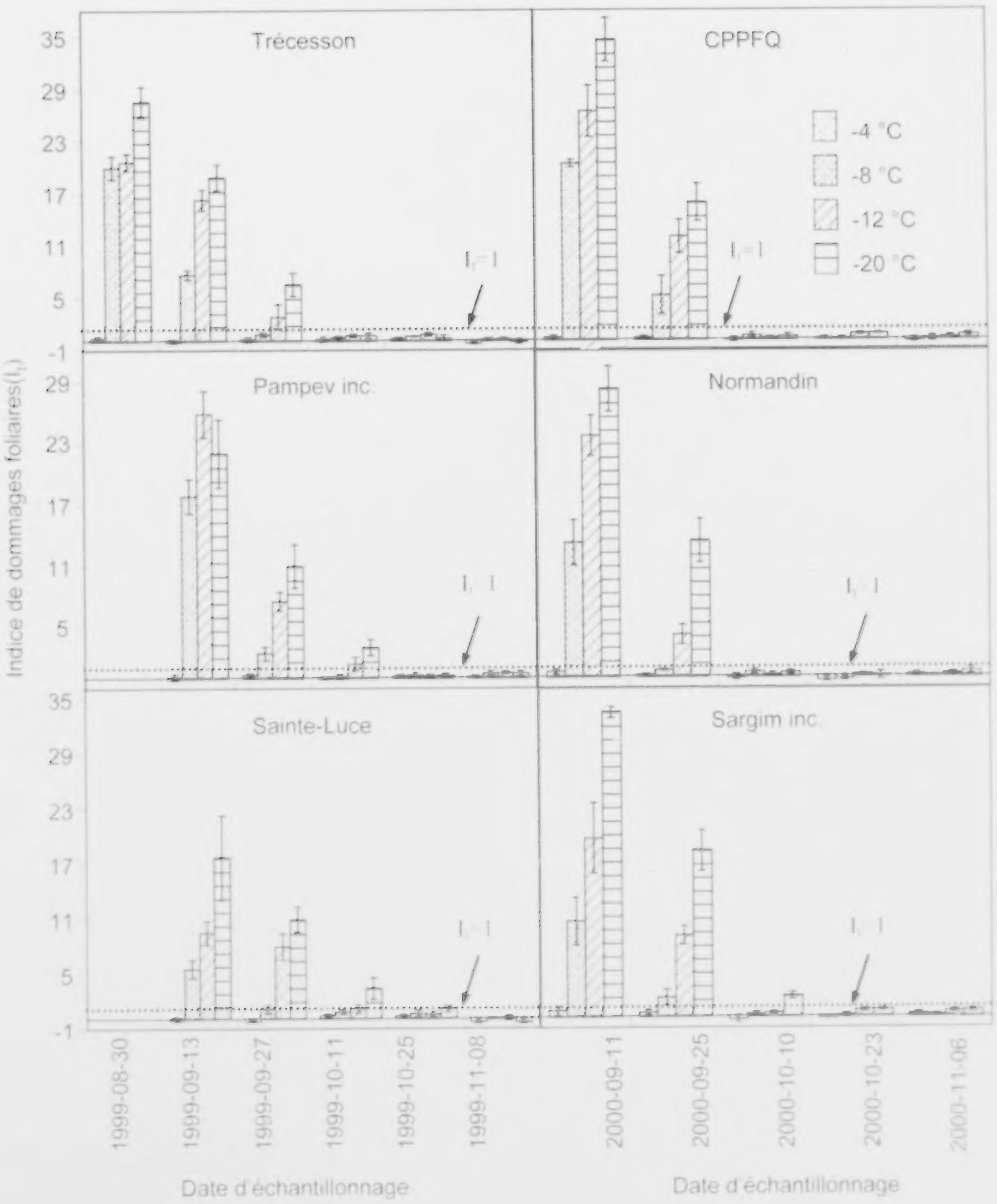

Figure 8. Variations de l'indice de dommages (I_f) de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (1+0), durant l'automne, en fonction des températures de congélation dans les six pépinières forestières.

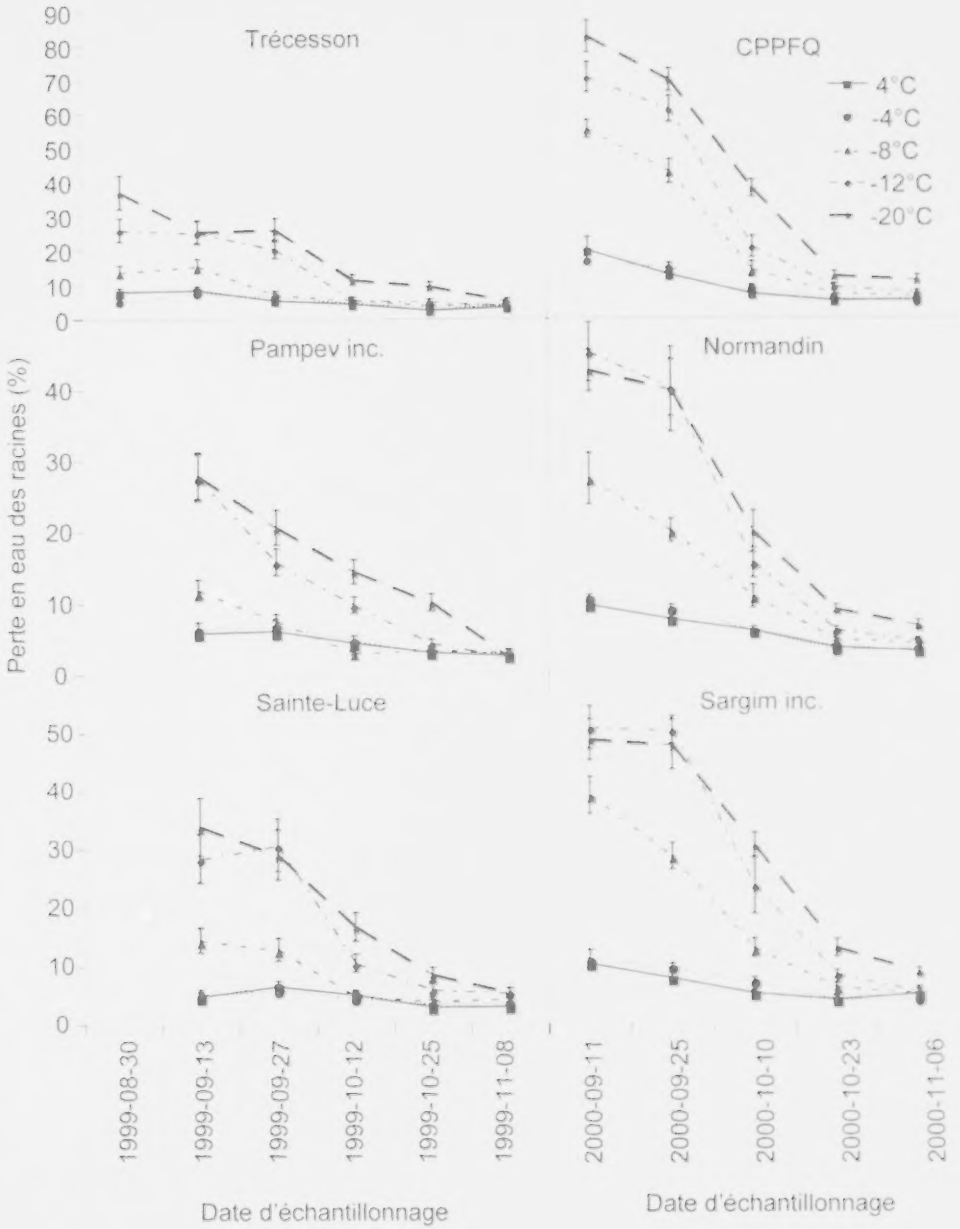

Figure 9. Variations du pourcentage de perte en eau des racines des plants d'épinette blanche (1+0), durant l'automne, en fonction des températures de congélation dans les six pépinières forestières.

Tableau 4. Comparaisons multiples des moyennes du pourcentage de perte en eau des racines des plants d'épinette blanche (1+0) entre les températures de congélation, par date d'échantillonnage

Pépinière	Date	Températures de congélation (gel artificiel)				
		T_0 = 4 °C	T_1 = -4 °C	T_2 = -8 °C	T_3 =-12 °C	T_4 =-20 °C
Pampev	13-09-99	5,889 a*	6,597 ab	11,863 b	27,575 c	27,783 c
	27-09-99	6,105 a	6,999 a	7,602 a	15,766 b	20,600 b
	12-10-99	4,471 a	4,907 a	3,103 a	9,813 b	14,402 b
	25-10-99	3,134 a	3,121 a	3,526 a	4,453 a	10,137 b
	08-11-99	2,704 a	3,102 a	3,226 a	2,577 a	2,482 a
Sainte-Luce	13-09-99	4,737 a	5,186 a	14,419 b	28,367 bc	33,753 c
	27-09-99	6,467 a	5,897 a	12,832 a	30,683 b	28,982 b
	12-10-99	5,083 ab	4,564 a	4,791 ab	10,511 bc	16,648 c
	25-10-99	2,939 a	3,600 a	4,016 ab	6,002 ab	8,492 b
	08-11-99	3,029 a	3,799 a	4,413 a	5,505 a	5,465 a
Trécesson	30-08-99	7,655 ab	5,135 a	13,574 bc	25,710 cd	36,751 d
	13-09-99	8,164 a	7,492 a	15,170 ab	24,899 b	25,107 b
	27-09-99	5,138 a	6,358 a	6,929 a	20,045 b	25,646 b
	12-10-99	4,130 a	4,587 a	5,334 ab	5,246 a	11,115 b
	25-10-99	2,288 a	3,347 ab	3,820 ab	4,831 bc	9,247 c
	08-11-99	3,078 a	3,677 a	4,060 a	3,742 a	5,002 a
CPPFQ	11-09-00	19,479 a	16,714 a	55,138 b	70,466 bc	82,526 c
	25-09-00	12,391 a	14,391 a	42,595 b	60,886 bc	69,580 c
	10-10-00	6,754 a	8,674 a	13,806 b	20,415 b	37,511 c
	23-10-00	4,724 a	5,488 a	6,819 ab	8,859 bc	11,903 c
	06-11-00	5,028 ab	4,406 a	6,245 ab	7,100 bc	10,721 c
Normandin	11-09-00	9,784 a	10,733 a	27,461 b	45,281 c	42,681 bc
	25-09-00	7,784 a	9,249 a	20,146 b	40,219 c	39,970 c
	10-10-00	6,143 a	6,198 a	10,950 b	15,571 bc	19,985 c
	23-10-00	3,762 a	3,508 a	4,984 ab	6,268 bc	9,124 c
	06-11-00	3,280 a	3,600 a	4,429 ab	4,778 ab	6,895 b
Sargim	11-09-00	10,456 a	11,103 a	39,184 b	50,890 c	48,776 bc
	25-09-00	7,961 a	9,831 a	28,745 b	50,429 c	47,893 c
	10-10-00	5,303 a	7,406 a	13,070 b	23,759 bc	30,558 c
	23-10-00	4,244 a	4,333 a	6,400 ab	8,574 bc	13,089 c
	06-11-00	5,235 a	4,384 a	5,328 ab	5,674 ab	8,943 b

* Horizontalement, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil α = 5 %, selon la méthode de Tukey.

Tableau 5. Comparaisons multiples des moyennes du pourcentage de perte en eau des racines des plants d'épinette blanche (1+0) entre les dates d'échantillonnage, par température de congélation

Température (gel artificiel)	Dates d'échantillonnages 30-08-99	13-09-99	27-09-99	12-10-99	25-10-99	08-11-99
			Pampev			
T_0 = 4 °C		5,889 ab*	6,105 a	4,471 abc	3,134 bc	2,704 c
T_1 = -4 °C		6,597 a	6,999 a	4,907 ab	3,121 b	3,102 b
T_2 = -8 °C		11,863 a	7,602 a	3,103 b	3,526 b	3,226 b
T_3 = -12 °C		27,575 a	15,766 ab	9,813 b	4,453 c	2,577 c
T_4 = -20 °C		27,783 a	20,600 ab	14,402 bc	10,137 c	2,482 d
			Sainte-Luce			
T_0 = 4 °C		4,737 a	6,467 a	5,083 a	2,939 a	3,029 a
T_1 = -4 °C		5,186 a	5,897 a	4,564 a	3,600 a	3,799 a
T_2 = -8 °C		14,419 a	12,832 a	4,791 b	4,016 b	4,413 b
T_3 = -12 °C		28,367 a	30,683 a	10,511 b	6,002 b	5,505 b
T_4 = -20 °C		33,753 a	28,982 a	16,648 ab	8,492 bc	5,465 c
			Trécesson			
T_0 = 4 °C	7,655 a	8,164 a	5,138 ab	4,130 abc	2,288 c	3,078 bc
T_1 = -4 °C	5,135 ab	7,492 a	6,358 ab	4,587 ab	3,347 b	3,677 ab
T_2 = -8 °C	13,574 ab	15,170 a	6,929 bc	5,334 c	3,820 c	4,060 c
T_3 = -12 °C	25,710 a	24,899 a	20,045 a	5,246 b	4,831 b	3,742 b
T_4 = -20 °C	36,751 a	25,107 a	25,646 a	11,115 b	9,247 bc	5,002 c

Température (gel artificiel)	Dates d'échantillonnages 11-09-00	25-09-00	10-10-00	23-10-00	06-11-00
		CPPFQ			
T_0 = 4 °C	19,479 a	12,391 a	6,754 b	4,724 b	5,028 b
T_1 = -4 °C	16,714 a	14,391 a	8,674 b	5,488 c	4,406 c
T_2 = -8 °C	55,138 a	42,595 a	13,806 b	6,819 c	6,245 c
T_3 = -12 °C	70,466 a	60,886 a	20,415 b	8,859 c	7,100 c
T_4 = -20 °C	82,526 a	69,580 a	37,511 b	11,903 c	10,721 c
		Normandin			
T_0 = 4 °C	9,784 a	7,784 ab	6,143 b	3,762 c	3,280 c
T_1 = -4 °C	10,733 a	9,249 ab	6,198 b	3,508 c	3,600 c
T_2 = -8 °C	27,461 a	20,146 a	10,950 b	4,984 c	4,429 c
T_3 = -12 °C	45,281 a	40,219 a	15,571 b	6,268 c	4,778 c
T_4 = -20 °C	42,681 a	39,970 a	19,985 b	9,124 c	6,895 c
		Sargim			
T_0 = 4 °C	10,456 a	7,961 ab	5,303 b	4,244 c	5,235 c
T_1 = -4 °C	11,103 a	9,831 ab	7,406 b	4,333 c	4,384 c
T_2 = -8 °C	39,184 a	28,745 a	13,070 b	6,400 c	5,328 c
T_3 = -12 °C	50,890 a	50,429 a	23,759 b	8,574 c	5,674 c
T_4 = -20 °C	48,776 a	47,893 a	30,558 b	13,089 c	8,943 c

* Horizontalement, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil α = 5 %, selon la méthode de Tukey.

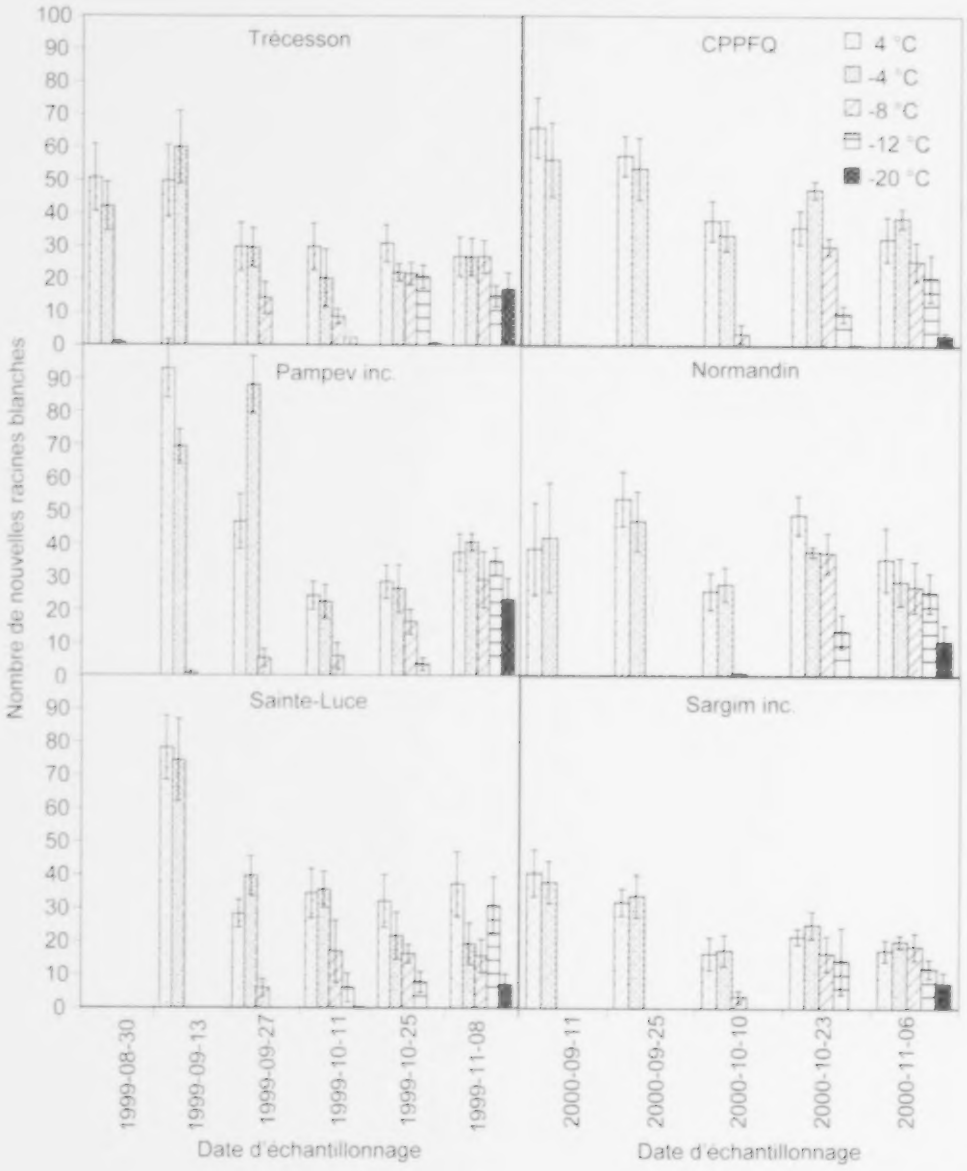

Figure 10. Formation de nouvelles racines des plants d'épinette blanche (1+0) lors des différentes dates d'échantillonnage selon les traitements de gel pour les six pépinières forestières.

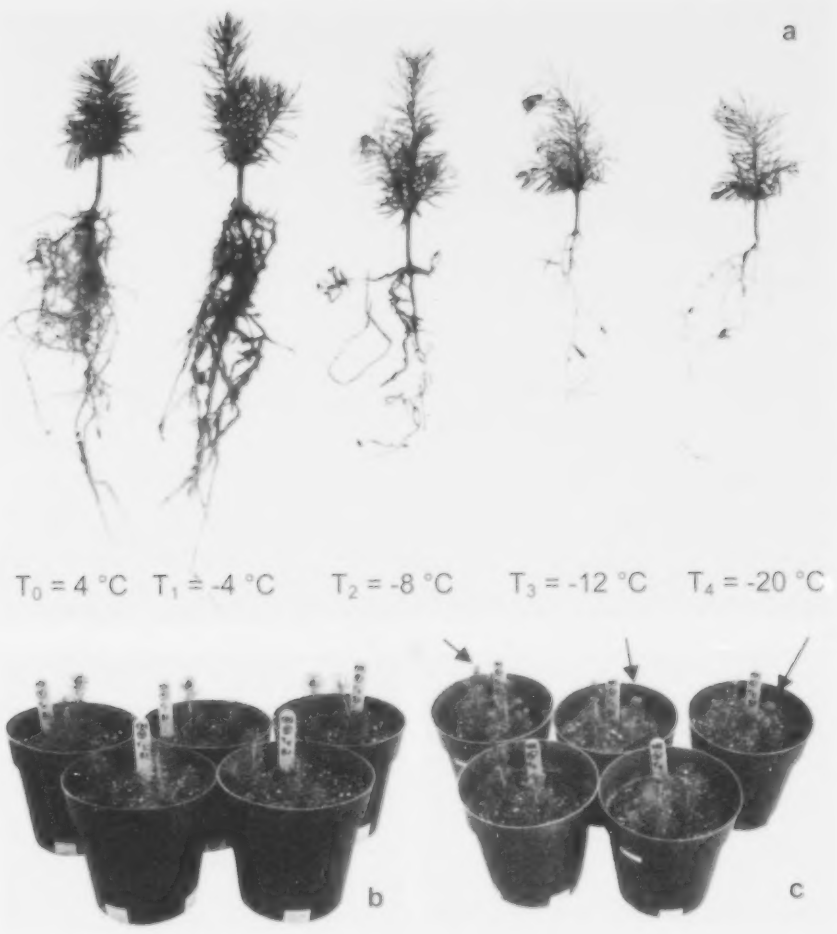

Figure 11.

a- Exemple des dommages causés aux parties aériennes et racinaires des plants d'épinette blanche (1+0) en réaction aux différentes intensités de gel artificiel (T_0 = 4 °C, T_1 = -4 °C, T_2 = -8 °C, T_3 = -12 °C et T_4 = -20 °C) et après à une période favorable de croissance de 21 jours dans des pots placés en serre. Notez que, dès la fin du mois d'août, les plants ont pu tolérer le traitement de congélation de -4 °C alors que les autres traitements (T_2 = -8 °C, T_3 = -12 °C et T_4 = -20 °C) ont pu entraîner la mort des plants. (Pépinière de Trécesson, date d'échantillonnage : ***30 août 1999***).

b- Tolérance des parties aériennes des plants d'épinette blanche (1+0) aux différentes intensités de gel artificiel évaluées (T_0 = 4 °C, T_1 = -4 °C, T_2 = -8 °C, T_3 = -12 °C et T_4 = -20 °C). Les deux plants empotés dans chaque pot ont été soumis à la même température. Chacun des cinq pots représentent un échantillon des différentes températures de gel artificiel. Par la suite, les plants ont été soumis à des conditions favorables de croissance en serre pendant 21 jours. Les dommages observés ont été identiques pour les huit plants utilisés, peu importe la température de congélation (Pépinière de Trécesson, date d'échantillonnage : ***12 octobre 1999***).

c- Tolérance des parties aériennes des semis d'épinette blanche (1+0) aux différentes intensités de gel artificiel évaluées (T_0 = 4 °C, T_1 = -4 °C, T_2 = -8 °C, T_3 = -12 °C et T_4 = -20 °C). Après avoir subi les gels artificiels, les plants ont été soumis à des conditions favorables de croissance en serre pendant 21 jours. Le débourrement des bourgeons (flèches) indique que ces derniers n'ont pas été endommagés par les différentes intensités de gel artificiel (Pépinière de Trécesson, date d'échantillonnage : ***6 novembre 1999***).

Pour vérifier si nous pouvions utiliser un seul modèle valable pour toutes les dates, nous nous sommes assurés, au départ, que les paramètres β_0 à β_4 et β_6 à β_9 étaient différents de zéro (équation 4). Par la suite, nous avons vérifié si les paramètres différaient de façon significative d'une date à l'autre. Les résultats de ces analyses ont révélé que leurs différences étaient significatives d'une date à l'autre et qu'il valait mieux conserver un modèle à chaque date.

2.2.4 Indice de Jian

L'évaluation visuelle des dommages causés aux parties aériennes, exposées aux différents traitements de congélation, estimés selon l'indice de Jian (échelle 0 à 5), révèle que les plants soumis au traitement T_1 = -4 °C n'ont montré aucun dommage pendant la période d'échantillonnage (Figure 11a-c). Quelle que soit la région écologique ou la pépinière, les plants qui n'ont pas résisté aux traitements T_2 = -8 °C, T_3 = -12 °C et T_4 = -20 °C, pendant les premières dates d'échantillonnage, étaient très endommagés ou morts (Figure 11a). Par contre, pendant les premiers échantillonnages et ce, pour toutes les températures de congélation évaluées, de la mi-octobre ou vers la fin octobre, selon la pépinière, tous les constituants (aiguilles, tige, bourgeons, racines, etc.) des parties aériennes des plants d'épinette blanche (1+0) étaient exempts de dommage visible (Figure 11b). Du point de vue quantitatif, l'absence de dommage foliaire est associée à un indice $I_j < 1$.

2.3 Modèles mathématiques reliant le ratio de matière sèche à la conductivité électrolytique et au pourcentage de perte en eau des racines

Dans toutes les pépinières et pour chacune des températures, le ratio de matière sèche de la partie aérienne est en général fortement corrélé, de manière négative, aussi bien à la conductivité électrolytique qu'au pourcentage de perte en eau des racines (Tableau 6). Par ailleurs, l'introduction simultanée de ces deux dernières variables indépendantes a généralement amélioré le coefficient de détermination du modèle mathématique hyperbolique reliant le ratio de matière sèche à la conductivité électrolytique relative et au pourcentage de perte en eau des racines (Figure 12a-c). À l'exception des températures de 4 °C et de -4 °C (pépinières de Trécesson et de Sainte-Luce), les paramètres associés à la perte en eau et à la conductivité électrolytique de ce modèle hyperbolique sont significatifs au seuil de 5 %. Les coefficients de détermination de ces modèles significatifs variaient de 0,66 à 0,97 (Tableau 7).

2.4 Seuils de tolérance au gel et prévision des risques de gel

L'élaboration de seuils de tolérance au gel repose sur l'utilisation combinée des résultats observés, spécifiques aux variables directes et indirectes d'évaluation du degré d'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0). Ces seuils ont permis de mieux définir l'endurcissement graduel afin qu'aucun constituant (aiguilles, bourgeons, tige, racines, etc.) des plants d'épinette blanche (1+0) ne soit endommagé (Figures 13 et 14). La prévision de ces seuils de tolérance au gel des plants en pépinière est possible grâce au suivi de l'évolution du ratio de matière sèche de la partie aérienne. Cette variable est facilement mesurable par le pépiniériste et elle est fortement corrélée, de façon positive, au cumul du nombre d'heures d'exposition au froid dans chacune des pépinières (Figure 15). Généralement, le ratio de matière sèche dans les six pépinières a varié de 23,4 à 28 % de la fin août au début septembre alors qu'il a varié de 36,6 à 41,5 % vers la mi-novembre. Les taux d'accroissement les plus importants du ratio de matière sèche ont été observés de la fin du mois de septembre à la fin du mois d'octobre.

Le taux d'acquisition de tolérance au gel quotidien de chacune des pépinières varie selon les périodes d'échantillonnage. Ce taux se calcule à partir des pentes des droites entre deux dates d'échantillonnages successives (Figure 13, Annexe 1a-b). Ces taux peuvent être utilisés pour générer des seuils quotidiens de tolérance au gel des plants d'épinette blanche (1+0) propres à chaque pépinière (Annexe 1a-b). Les parties aériennes des plants d'épinette blanche (1+0) produits à la pépinière de Trécesson, la plus nordique, ont acquis une tolérance au gel à des températures plus basses, beaucoup plus rapidement par comparaison aux plants produits dans les autres pépinières. En effet, dès la mi-octobre, les parties aériennes des plants produits dans cette pépinière résistaient à une température de -20 °C, sans aucun dommage apparent (Figures 11b, 13).

Tableau 6. **Coefficients de corrélation des régressions simples reliant le ratio de matière sèche de la partie aérienne (ratio MS/MF) au pourcentage de perte en eau des racines (PPE) et à la conductivité électrolytique relative (CR) de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (1+0), pour chaque température de congélation**

		Ratio MS/MF	
Pépinière	Température	PPE	CR
Pampev	T_0 = 4 °C	-0,80 (0,0001)*	-0,66 (0,0015)
	T_1 = -4 °C	-0,78 (0,0001)	-0,60 (0,0054)
	T_2 = -8 °C	-0,84 (0,0001)	-0,82 (0,0001)
	T_3 = -12 °C	-0,96 (0,0001)	-0,88 (0,0001)
	T_4 = -20 °C	-0,87 (0,0001)	-0,89 (0,0001)
Sainte- Luce	T_0 = 4 °C	-0,54 (0,0139)	0,14 (0,5574)
	T_1 = -4 °C	-0,51 (0,0230)	0,24 (0,3163)
	T_2 = -8 °C	-0,80 (0,0001)	-0,80 (0,0001)
	T_3 = -12 °C	-0,88 (0,0001)	-0,88 (0,0001)
	T_4 = -20 °C	-0,79 (0,0001)	-0,85 (0,0001)
Trécesson	T_0 = 4 °C	-0,88 (0,0001)	0,19 (0,3813)
	T_1 = -4 °C	-0,55 (0,0051)	0,10 (0,6498)
	T_2 = -8 °C	-0,75 (0,0001)	-0,84 (0,0001)
	T_3 = -12 °C	-0,89 (0,0001)	-0,91 (0,0001)
	T_4 = -20 °C	-0,93 (0,0001)	-0,95 (0,0001)
CPPFQ	T_0 = 4 °C	-0,82 (0,0001)	-0,03 (0,9145)
	T_1 = -4 °C	-0,95 (0,0001)	-0,35 (0,1335)
	T_2 = -8 °C	-0,94 (0,0001)	-0,80 (0,0001)
	T_3 = -12 °C	-0,95 (0,0001)	-0,86 (0,0001)
	T_4 = -20 °C	-0,98 (0,0001)	-0,88 (0,0001)
Normandin	T_0 = 4 °C	-0,90 (0,0001)	-0,31 (0,1796)
	T_1 = -4 °C	-0,96 (0,0001)	-0,68 (0,0011)
	T_2 = -8 °C	-0,90 (0,0001)	-0,70 (0,0005)
	T_3 = -12 °C	-0,95 (0,0001)	-0,78 (0,0001)
	T_4 = -20 °C	-0,93 (0,0001)	-0,87 (0,0001)
Sargim	T_0 = 4 °C	-0,78 (0,0001)	-0,44 (0,0504)
	T_1 = -4 °C	-0,82 (0,0001)	-0,56 (0,0096)
	T_2 = -8 °C	-0,97 (0,0001)	-0,71 (0,0005)
	T_3 = -12 °C	-0,93 (0,0001)	-0,84 (0,0001)
	T_4 = -20 °C	-0,96 (0,0001)	-0,94 (0,0001)

* Coefficient de corrélation significatif au seuil a = 0,05

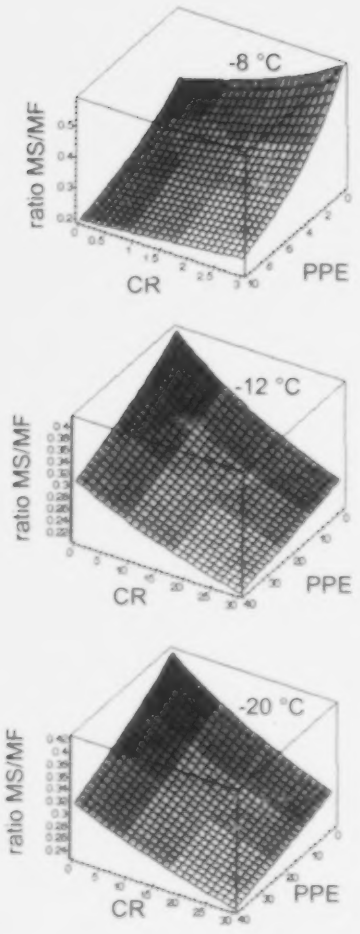

Figure 12. Exemple d'illustration graphique du modèle mathématique hyperbolique reliant le ratio de matière sèche de la partie aérienne (ratio MS/MF) à la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne (CR) et au pourcentage de perte en eau des racines (PPE) à différentes températures (-8, -12 et -20 °C), pour la pépinière de Trécesson.

Tableau 7. Modèles mathématiques hyperboliques reliant le ratio de matière sèche de la partie aérienne (ratio MS/MF) au pourcentage de perte en eau des racines (PPE) et à la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne des plants (CR) d'épinette blanche (1+0), pour chaque température de congélation

Pépinière	Température	Modèle	R^2
Pampev	T_0 = 4 °C	y = 1 - (0,65 + 0,21 PPE + 0,87 CR)	0,69
	T_1 = -4 °C	y = 1 - (1,03 + 0,19 PPE + 0,65 CR)	0,66
	T_2 = -8 °C	y = 1 - (2,61 + 0,07 PPE + 0,04 CR)	0,83
	T_3 = -12 °C	y = 1 - (2,57 + 0,05 PPE + 0,01 CR)	0,96
	T_4 = -20 °C	y = 1 - (2,49 + 0,03 PPE + 0,04 CR)	0,95
Sainte- Luce	T_0 = 4 °C	y = 1 - (3,22 + 0,14 PPE - 0,30 CR)	0,30
	T_1 = -4 °C	y = 1 - (3,28 + 0,20 PPE - 0,46 CR)	0,35
	T_2 = -8 °C	y = 1 - (2,55 + 0,03 PPE - 0,10 CR)	0,80
	T_3 = -12 °C	y = 1 - (2,68 + 0,01 PPE + 0,06 CR)	0,82
	T_4 = -20 °C	y = 1 - (2,70 + 0,01 PPE + 0,03 CR)	0,84
Trécesson	T_0 = 4 °C	y = 1 - (2,67 + 0,24 PPE - 0,32 CR)	0,77
	T_1 = -4 °C	y = 1 - (2,88 + 0,18 PPE - 0,27 CR)	0,26
	T_2 = -8 °C	y = 1 - (2,44 + 0,04 PPE + 0,06 CR)	0,88
	T_3 = -12 °C	y = 1 - (2,41 + 0,02 PPE + 0,05 CR)	0,92
	T_4 = -20 °C	y = 1 - (2,36 + 0,02 PPE + 0,04 CR)	0,97
CPPFQ	T_0 = 4 °C	y = 1 - (0,97 + 0,92 PPE + 0,18 CR)	0,86
	T_1 = -4 °C	y = 1 - (0,80 + 1,03 PPE + 0,02 CR)	0,89
	T_2 = -8 °C	y = 1 - (1,50 + 0,44 PPE + 0,19 CR)	0,97
	T_3 = -12 °C	y = 1 - (1,64 + 0,30 PPE + 0,28 CR)	0,95
	T_4 = -20 °C	y = 1 - (1,46 + 0,31 PPE + 0,28 CR)	0,97
Normandin	T_0 = 4 °C	y = 1 - (1,54 + 0,82 PPE - 0,05 CR)	0,80
	T_1 = -4 °C	y = 1 - (1,37 + 0,75 PPE + 0,24 CR)	0,91
	T_2 = -8 °C	y = 1 - (1,78 + 0,41 PPE + 0,14 CR)	0,93
	T_3 = -12 °C	y = 1 - (1,90 + 0,28 PPE + 0,17 CR)	0,97
	T_4 = -20 °C	y = 1 - (1,84 + 0,24 PPE + 0,21 CR)	0,96
Sargim	T_0 = 4 °C	y = 1 - (1,73 + 0,61 PPE + 0,31 CR)	0,64
	T_1 = -4 °C	y = 1 - (1,77 + 0,73 PPE - 0,13 CR)	0,67
	T_2 = -8 °C	y = 1 - (2,02 + 0,36 PPE + 0,08 CR)	0,94
	T_3 = -12 °C	y = 1 - (2,27 + 0,12 PPE + 0,27 CR)	0,95
	T_4 = -20 °C	y = 1 - (2,44 + 0,002 PPE + 0,31 CR)	0,97

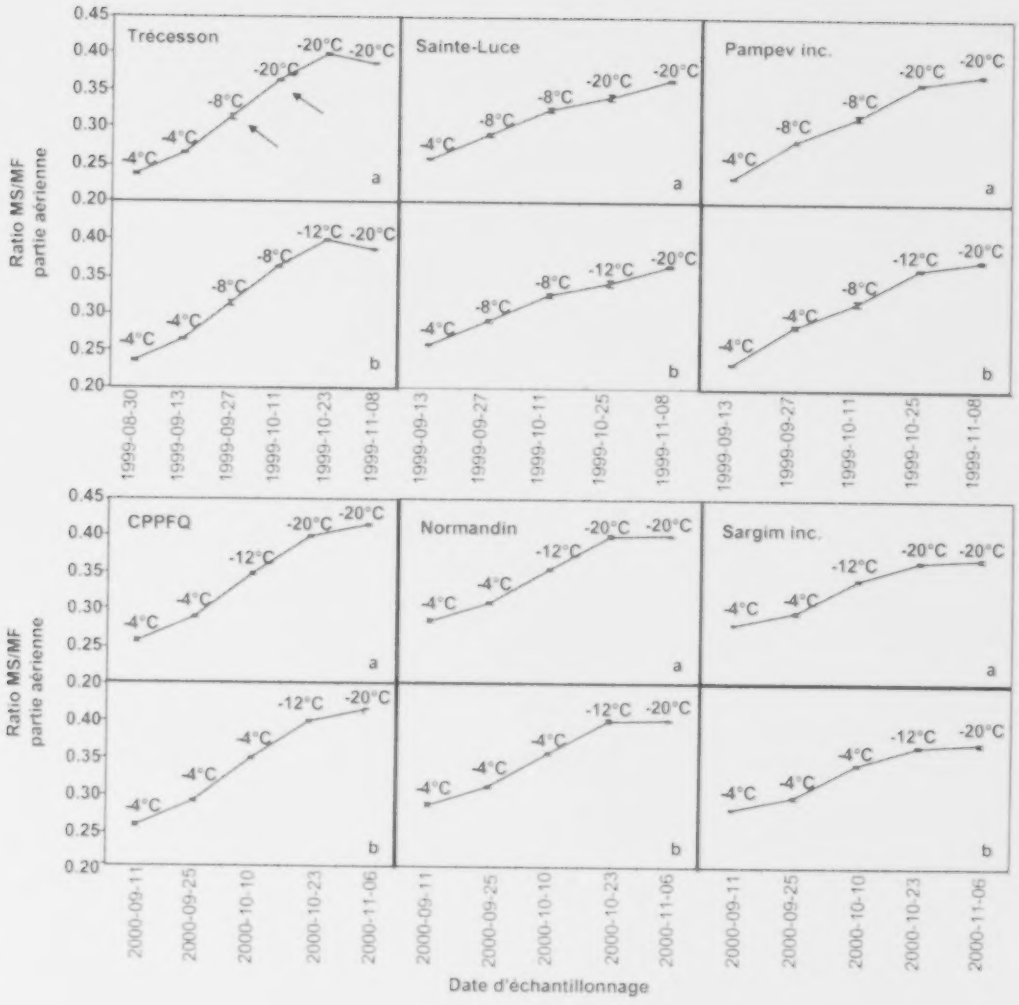

Figure 13. Évolution des seuils de tolérance au gel, dans chacune des six pépinières, spécifiques : a) aux parties aérienne et b) aux racines des plants d'épinette blanche (1+0). Les flèches indiquent que des taux d'acquisition quotidiens de tolérance au gel des plants peuvent être déduits des pentes (0°C/jour) propres aux seuils de tolérance, calculés entre deux dates consécutives d'échantillonnage.

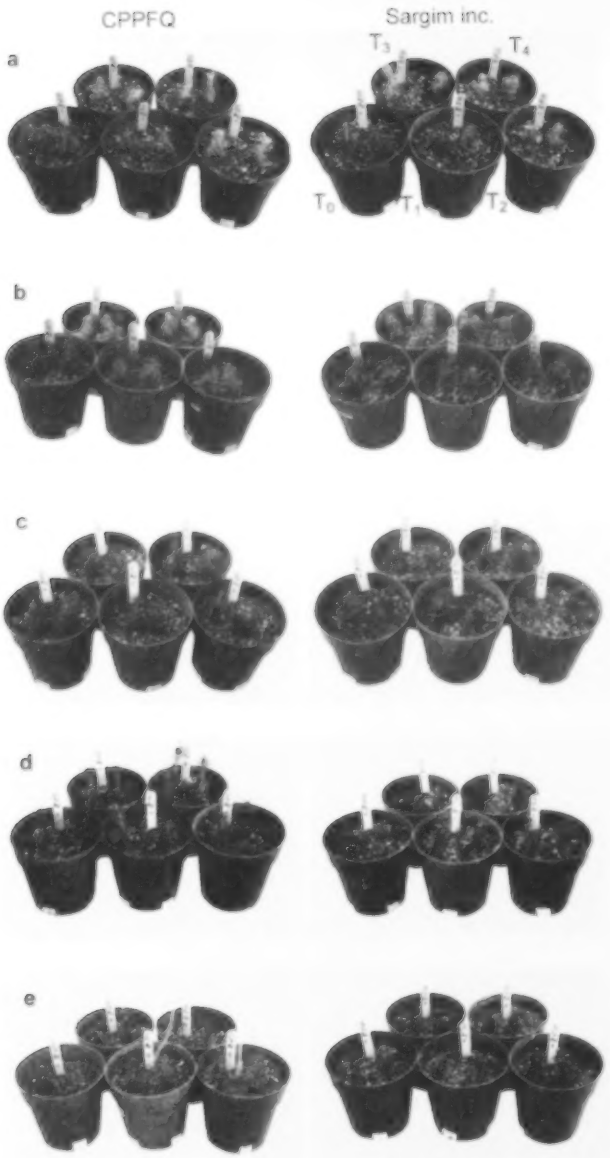

Figure 14. Exemple d'évolution des dommages causés aux plants d'épinette blanche (1+0) en réaction aux différentes températures de gel artificiel (T_0 = 4 °C, T_1 = -4 °C, T_2 = -8 °C, T_3 = -12 °C et T_4 = -20 °C) durant les différents échantillonnages (a : 11 septembre, b : 25 septembre, c : 10 octobre, d : 23 octobre et e : 6 novembre 2000) effectués à la pépinière de Sargim inc. et au CPPFQ. Les deux plants empotés dans chaque pot ont été soumis à la même température. Chacun des cinq pots représentent un échantillon des différentes températures de gel artificiel. Par la suite, les plants ont été soumis à des conditions favorables de croissance en serre pendant 21 jours. Les dommages observés ont été identiques pour les huit plants utilisés, peu importe la température de congélation.

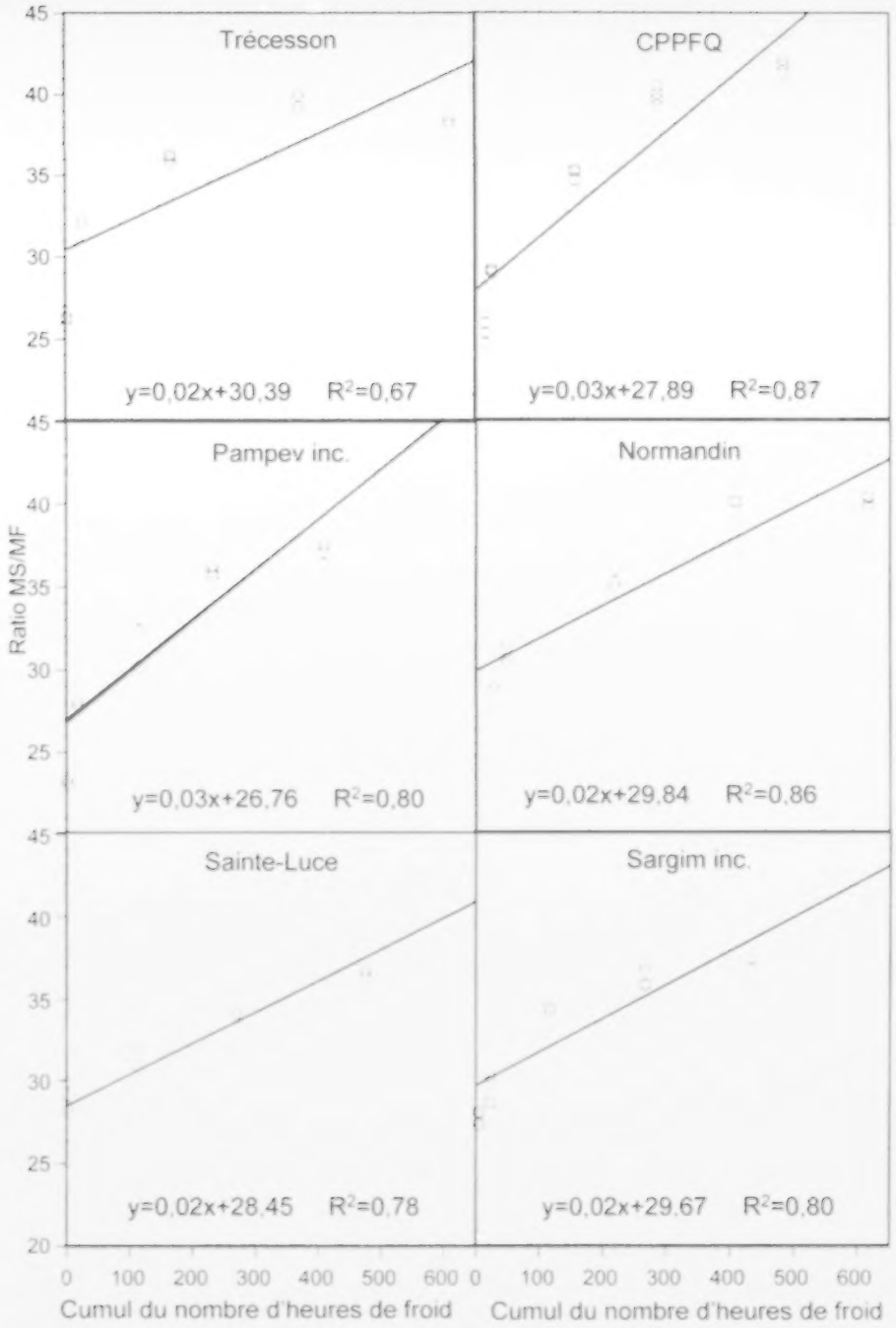

Figure 15. Corrélations reliant le ratio de matière sèche des parties aériennes des plants d'épinette blanche (1+0) au cumul du nombre d'heures d'exposition au froid dans les six pépinières échantillonnées.

Chapitre trois

Discussion

L'élaboration des seuils de tolérance au gel selon les régions écologiques permettra de prédire les risques et les seuils de tolérance au gel quotidien afin qu'aucun constituant (aiguilles, bourgeons, tige, racines, etc.) des plants d'épinette blanche (1+0) ne soit endommagé. Ces seuils permettront aux pépiniéristes de mieux cibler les périodes à risque et de prendre les mesures adéquates de protection contre le gel. À l'inverse de la majorité des travaux antérieurs pour lesquels les seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche sont déterminés à l'aide de LT_{50} (température léthale pour laquelle 50 % des plants meurent en réaction à une température donnée de gel) et en conditions contrôlées ou semi-contrôlées de croissance (Bigras et D'Aoust 1992, 1993; Calmé *et al.* 1993), les seuils de la présente étude (Figure 13) sont définis de telle façon qu'aucun organe des plants ne soit endommagé, à l'échelle opérationnelle; tout en tenant compte, indirectement, des interactions complexes qui existent entre la source des semences, les variables environnementales propres à la région écologique et les régies de culture (irrigation et fertilisation) utilisées en pépinière forestière. En plus des variables indirectes d'évaluation de la tolérance au gel, la validation de ces seuils limites et graduels de tolérance au gel des parties aériennes et des racines est effectuée à la suite de l'évaluation, dans le cadre de bioessais, c'est-à-dire les tests directs, de l'effet des différentes températures de gel artificiel sur l'initiation de nouvelles racines et de l'apparition des dommages observés au niveau de la partie aérienne. Dans la présente étude, la régénération de nouvelles racines est utilisée comme un indicateur qui intègre à la fois la survie et le fonctionnement physiologique du plant, à la suite d'un gel artificiel. La tolérance au gel de la partie aérienne des plants et la capacité de régénération des nouvelles racines ont varié selon la température de gel artificiel et la date d'échantillonnage. La formation et le développement de nouvelles racines des conifères, plus particulièrement celles qui suivent l'apparition des bourgeons terminaux, sont intimement liés au fonctionnement et à la capacité photosynthétique actuelle des plants (Marshall 1985, van den Driessche 1987, Lippu 1998, Pellicer *et al.* 2000, Pregitzer 2003). Le développement de nouvelles racines et l'absence de dommage visible sur la partie aérienne, en réaction à un traitement de gel, démontre clairement la tolérance des plants à cette température.

Comme l'intervalle de température qui sépare deux traitements successifs de congélation artificielle est d'au moins 4 °C, les seuils déterminés dans la présente étude sous-estiment les taux d'acquisition de tolérance au gel des parties aériennes et des racines des plants d'épinette blanche (1+0). Dans tous les tests de gel artificiel, le taux de refroidissement appliqué est de 2 °C/heure (Figure 3), taux qui se rapproche, en moyenne, de celui des gels printanier et d'automne à l'échelle de la planète (Levitt 1980, Palta et Weiss 1993). Des faibles taux de refroidissement (1 à 2 °C/heure) facilitent la formation des cristaux de glace dans l'eau extracellulaire. Des taux de refroidissement élevés ne laissent pas le temps à l'eau intracellulaire de migrer vers les sites gelés. Palta et Weiss (1993) rapportent que l'augmentation du taux de refroidissement de 1 à 2,9 °C a eu des effets négatifs sur la survie, la conductivité électrolytique et la reprise de la capacité photosynthétique. Cela démontre clairement que notre démarche d'application des gels artificiels se rapproche sensiblement des conditions naturelles.

L'ajustement du ratio de la matière sèche de la partie aérienne à un modèle hyperbolique (Tableau 6, Figure 12a-c) et son utilisation dans la prévision des seuils de tolérance au gel viennent confirmer, après validation, les possibilités de sa mise en application dans les pépinières forestières. Certains travaux menés en conditions contrôlées ou semi-contrôlées ont suggéré que le ratio de matière sèche (RMS) pouvait être utilisé comme indicateur de tolérance au gel (Colombo 1990, Hansen et Eriksen 1993, Binnie *et al.* 1994, Calmé *et al.* 1995, Bigras *et al.* 2001). D'autres travaux ont mis l'accent sur le développement de modèles prédictifs des risques de gel lesquels font appel à des variables environnementales (Cannell et Smith 1984, Greer *et al.* 2001, Timmis *et al.* 1994).

Cependant, les modèles prédictifs des risques de gel pourvus d'une validation propre à la pépinière, facilement utilisables par le pépiniériste, sont presque inexistants (Colombo *et al.* 2001), d'où l'originalité de ce travail dont les résultats auront des applications immédiates en pépinière forestière.

Dans une même pépinière, le RMS des parties aériennes peut varier, durant l'automne, de 25 à 41 %. Même si les variations de ce ratio sont parfois faibles entre des dates d'échantillonnage consécutives, elles sont généralement associées à des modifications majeures en matière de tolérance graduelle au gel. À la fin de la période automnale, le RMS devient relativement constant, mais le degré de tolérance au gel continue de s'accentuer plus particulièrement aux températures de gel extrêmes (Colombo 1990). Cette tolérance accrue au gel s'accompagne de modifications biophysiques et biochimiques significatives, en matière d'élasticité de la paroi cellulaire, du contenu en lipides, protéines, acides aminés et sucres (Zwiazek *et al.* 2001). L'augmentation du RMS, dès l'apparition des bourgeons, est généralement attribuée à la réduction du volume d'eau symplastique, à l'accumulation de matière sèche dans l'apex des parties aériennes engendrée par la lignification des parois cellulaires et du xylème, ainsi qu'à l'augmentation des concentrations en protéines et en sucres dans le cytoplasme (Colombo 1990, Grossnickle 2000, Levitt 1980).

Dans les six pépinières forestières échantillonnées, la cinétique d'acquisition de tolérance au gel des plants d'épinette blanche (1+0) produits dans les récipients à parois ajourées a été graduelle selon les variables environnementales, et ce, en fonction de la région écologique. Selon la saison, Menzies *et al.* (1981) ont observé que la localisation de la pépinière peut engendrer à elle seule des tolérances au gel variant de 3 à 5 °C pour les plants de *Pinus radiata* D. Don. Ainsi, les parties aériennes des plants produits à la pépinière de Trécesson, la plus nordique, en comparaison de celles des autres pépinières, se sont endurcies plus rapidement et ont atteint une tolérance au gel précoce à -20 °C, dès la mi-octobre, sans qu'aucun constituant ne soit endommagé (Figures 11b, 13). Ces variations sont attribuables à la répartition géographique des pépinières forestières sur le vaste territoire du Québec. Les pépinières sont donc sujettes à des conditions climatiques régionales et locales différentes. Schuch *et al.* (1989a, b) ont comparé l'endurcissement des plants de sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) issus de deux sources de semences et cultivés dans trois pépinières des États de l'Oregon et de Washington. Les résultats de ces travaux ont montré que la localisation de la pépinière a un effet majeur sur l'endurcissement et le *désendurcissement*. Les plants cultivés dans la pépinière la plus nordique se sont révélés plus tolérants au gel que les plants cultivés dans la pépinière côtière, et cela de façon précoce. Simpson (1994) a utilisé des sources de semences d'épinette blanche représentatives de l'aire de distribution de cette espèce en Amérique du Nord et a observé que les bourgeons d'arbres provenant du nord sont plus endurcis au début de l'automne que ceux issus du sud. D'autres travaux (Repo *et al.* 2000) ont montré que l'amorce de l'endurcissement et de la tolérance accrue au gel sont plus précoces pour les provenances nordiques du pin sylvestre par comparaison de celles du sud, mais que ces différences s'estompent à la fin de la période d'endurcissement. Van den Driessche (1970) a comparé la tolérance au gel de trois provenances dans trois pépinières et a observé que la localisation de la pépinière a plus d'effets sur l'acquisition de tolérance au gel que les effets de la provenance.

L'acclimatation graduelle aux températures de gel artificiel a démontré que les plants d'épinette blanche acquièrent une tolérance progressive au gel. En effet, toutes les variables de tolérance au gel des parties aériennes et des racines des plants d'épinette blanche (1+0) ont varié de façon significative en fonction des dates d'échantillonnage (Figures 7-10, Tableaux 2-5). Durant l'automne, l'arrêt de croissance, la formation des bourgeons et la tolérance au gel progressive des parties aériennes et des racines sont fortement influencés par l'effet unique de la diminution de la photopériode ou combinée à celle de la baisse des températures de l'air et du sol (Bigras et D'Aoust 1992, 1993; Howe *et al.* 2003; Johnsen et Skrøppa 2000; Junttila 1989; Lamhamedi et Bernier 1994; Wareing 1956; Weiser 1970). Greer *et al.* (1989) ont démontré que le taux d'endurcissement (°C/jour) des plants de *Pinus radiata* D. Don est fortement corrélé aux variations causées par la diminution de la photopériode (min/jour). De plus, la baisse de la température pourrait être reconnue comme un signal majeur du déclenchement des processus physiologiques d'endurcissement. En effet, l'endurcissement des racines d'épinette blanche est fortement influencé par la diminution progressive des températures du substrat (Bigras et D'Aoust 1992). Leur résistance à de basses températures peut atteindre -23,3 °C (Havis 1976). Bien que la tolérance au gel des racines soit généralement faible et différée par rapport à celle des parties aériennes, la tolérance des racines d'épinette blanche

(1+0) des différentes sources de semences (vergers à graines) évaluées dans cette étude a atteint -12 °C vers la fin du mois d'octobre. Les racines d'épinette blanche sont reconnues pour leur tolérance accrue au gel par comparaison à plusieurs essences ligneuses (Havis 1976). Or, les températures du substrat dans les pépinières forestières n'ont jamais baissé en dessous de -5 °C durant l'automne (Figures 4 et 5).

L'acquisition de la tolérance au gel des plants, en pépinière forestière, est sous le contrôle d'interactions complexes de plusieurs facteurs, notamment : le génotype, la température, la photopériode, l'altitude, la latitude, l'intensité et la qualité de la lumière, l'irrigation et la fertilisation. Le contrôle et l'optimisation de l'irrigation et de la fertilisation selon les besoins des plants, surtout en automne, peuvent améliorer l'état d'endurcissement, ainsi que l'acquisition rapide de la tolérance au gel des plants (Boivin *et al.* 2002; Dumroese 2003; Lamhamedi *et al.* 2000a, 2001, 2002, 2003). La diminution des teneurs en eau du substrat favorise le développement de la cuticule des plants d'épinette blanche (1+0) (Stowe *et al.* 2001), ce qui permet de diminuer les pertes en eau, par transpiration épidermique, et par conséquent celles des plants engendrées par la dessiccation hivernale. De plus, la mise en place d'un calendrier de fertilisation ajusté au début de l'aoûtement des plants, lequel prend en compte non seulement la concentration en azote (N), mais aussi celle des autres éléments nutritifs (P, K, Ca et Mg), peut initier et même accélérer le processus d'endurcissement. Les plants de résineux dont la concentration en azote foliaire est faible (0,6 - 0,8 %) ont montré une faible tolérance au gel par rapport aux plants dont les concentrations sont optimales (1,6 - 2,3 %) (Klein *et al.* 1989, Rikala et Repo 1997). Par contre, cette différence en matière de tolérance au gel s'estompe lorsque la concentration en azote est relativement élevée (2,2 - 3,3 %) pour l'épinette de Norvège (Fløistad 2002). Lors du débourrement des plants de l'épinette de Norvège au printemps, Fløistad et Kohman (2004) ont montré que la concentration en azote foliaire de 1,8 % augmentait la vulnérabilité des plants au gel. En plus des doses de fertilisant, il serait important d'assurer le maintien des ratios entre les différents éléments minéraux (Lamhamedi et Gagnon 2002).

Dans les six pépinières, le RMS est fortement corrélé au cumul du nombre d'heures de froid. Les pépinières les plus nordiques ont accumulé plus d'heures de froid par rapport aux pépinières du sud (Figure 6), ce qui pourrait expliquer, en partie, la tolérance au gel accrue et précoce observée à la pépinière de Trécesson. Cependant, les différences de cinétique de tolérance au gel et la formation précoce des bourgeons pourraient être attribuables aux différences génétiques entre les provenances d'épinette blanche. En effet, l'influence de la photopériode sur la formation des bourgeons est régie par l'effet additif des gènes pour l'épinette de Norvège ou polygénique pour le pin sylvestre (Eriksson *et al.* 1978, Norell *et al.* 1986). Pour le sapin de Douglas, Jermstad *et al.* (2001) ont identifié des zones chromosomiques, appelées QTL (*Quantitative Trait Locus*), lesquelles contiennent des gènes qui contrôlent la tolérance au gel automnal et printanier. Pour le rhododendron, Lim *et al.* (1999) ont montré la présence d'une variabilité liée à la présence d'une protéine (25-kDa dehydrin) qui peut être utilisée comme marqueur génétique de sélection des individus les plus tolérants au gel. D'autres protéines de plusieurs espèces herbacées, dont la synthèse est sous contrôle génétique, ont été identifiées pour leur rôle en matière de tolérance au gel (Pihakaski-Maunsbach *et al.* 2003, Thomashow 1999).

Les seuils élaborés dans ce mémoire, propres aux racines et aux parties aériennes, sont déjà ajustés pour une saison de croissance. Ces seuils pourraient être utilisés par les pépiniéristes d'une région écologique donnée, ce qui les aiderait à suivre l'évolution des taux graduels de tolérance au gel hâtif des plants durant l'automne. La détermination indirecte de ces seuils, selon l'évolution du RMS ou le cumul du nombre d'heures d'exposition au froid à une échelle quotidienne, jumelée avec celle des prévisions des températures minimales dans la pépinière, permettra d'optimiser les interventions du pépiniériste, notamment l'irrigation contre le gel. Ainsi, l'utilisation de ces seuils comme outil de prévision de l'évolution graduelle de la tolérance au gel des plants d'épinette blanche permettra de diminuer l'ampleur des pertes de plants occasionnées par le gel, et de mieux rationaliser le coût de production des plants en pépinières forestières.

Conclusion et recommandations

Le suivi de l'évolution de la tolérance au gel des plants d'épinette blanche (1+0), dans six pépinières forestières de régions écologiques différentes, a permis la mise au point de seuils d'endurcissement propres à cette essence, pour la saison automnale. Les dispositifs expérimentaux ont été installés dans chacune des pépinières-échantillons, soit une pépinière par région écologique, en utilisant des graines issues de vergers différents (Tableau 1). L'élaboration de ces seuils est effectuée sur la base de l'évaluation de plusieurs variables de tolérance au gel aussi bien pour les parties aériennes que racinaires des plants. Les variables mesurées, à un intervalle régulier de deux semaines de la fin du mois d'août jusqu'au début novembre, sont la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne, le pourcentage de perte en eau des racines, l'indice de dommages foliaires (I_f), le ratio de matière sèche des parties aériennes (RMS), la capacité de croissance des racines et l'ampleur des dommages observés sur la partie aérienne, cette dernière évaluée à l'aide de l'indice de JIAN (1992).

Nos principales conclusions et recommandations propres à l'endurcissement des plants d'épinette blanche (1+0), en automne, sont :

- dans chacune des pépinières, la conductivité électrolytique relative de la partie aérienne, le pourcentage de perte en eau des racines, l'indice de dommages foliaires (I_f), le ratio de matière sèche des parties aériennes (RMS), la capacité de croissance des racines et l'ampleur des dommages causés à la partie aérienne ont été affectés de façon significative par la température de congélation et la date d'échantillonnage. Cela démontre que l'état d'endurcissement des plants diffère d'une date à l'autre (Tableaux 2-5, Figures 7-10);

- le ratio de la matière sèche de la partie aérienne est fortement corrélé à deux variables (conductivité électrolytique relative de la partie aérienne et pourcentage de perte en eau des racines) qui sont les plus utilisées dans l'évaluation de la tolérance au gel des plants;

- pour chacune des pépinières, l'évolution du ratio de la matière sèche de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (1+0) est fortement corrélée, de façon positive, au cumul du nombre d'heures d'exposition des plants au froid, lequel varie selon la région écologique;

- l'ensemble des variables de tolérance au gel a permis de déterminer les seuils de tolérance au gel selon les régions écologiques. Ces seuils pourraient être utilisés par les pépiniéristes comme outil de prévision de l'évolution graduelle de la tolérance au gel des plants d'épinette blanche afin d'optimiser les fréquences d'irrigation en matière de protection des cultures contre le gel;

- le taux d'acquisition de tolérance au gel quotidien dans chaque pépinière, calculé selon les courbes de seuils de tolérance au gel (Figure 13) et selon les pentes des droites entre deux dates d'échantillonnages successives, varie entre les périodes d'échantillonnage. Ce taux peut être utilisé pour générer les seuils graduels de tolérance au gel quotidien des plants d'épinette blanche (1+0) propres à chaque pépinière et, dans une certaine mesure, à chaque région écologique (Annexe 1a-b);

- les seuils de tolérance au gel sont déterminés de manière à ce qu'aucun constituant (aiguilles, bourgeons, tige, racines, etc.) des plants d'épinette blanche (1+0) ne soit endommagé et aussi pour satisfaire les préoccupations réelles des pépiniéristes. Ces seuils ne sont valables que pendant la période automnale pour laquelle le ratio de matière sèche de la partie aérienne des plants varie de 23 à 42 %;

- l'évolution des seuils de tolérance au gel (Figure 13) peut être utilisée pour produire, à l'échelle de la province de Québec, des cartes de risques de gel hâtif propres à la production de plants d'épinette blanche (1+0) en pépinière forestière tout en tenant compte de la tolérance au gel progressive de cette essence durant l'automne;

- chacune des méthodes d'évaluation de la tolérance au gel testées dans la présente étude, pourra être utilisée afin de caractériser les dommages causés par le gel. Chaque méthode nécessitera la détermination des seuils limites de tolérance au gel propres à la température cible, ainsi que leur calibrage à l'échelle opérationnelle. Ces seuils sont déterminés pour plusieurs variables de tolérance au gel (I_t, pourcentage de perte en eau des racines, ratio de matière sèche de la partie aérienne). Cependant, l'utilisation d'une méthode d'évaluation de la tolérance au gel dépend du choix et des objectifs du pépiniériste (investissement, formation du pépiniériste, précision, partie aérienne entière des plants (1+0), apex ou quelques aiguilles, seuil de tolérance : 50 ou 0 % de mortalité à la suite d'un gel, suivi à long terme, qualité et modalités de calibrage, etc.). La méthode idéale d'évaluation de la tolérance au gel devrait éliminer tout biais associé aux observations visuelles, être quantitative et faire l'objet d'une analyse statistique rapide, et intégrer les réponses morphologiques et physiologiques capables de mieux évaluer la performance des plants.

- la détermination du ratio de matière sèche de la partie aérienne des plants ou le cumul du nombre d'heures d'exposition au froid, à la base des plants, permettra de prévoir les seuils de tolérance au gel des plants d'épinette blanche. Cependant, l'optimisation de l'un de ces paramètres nécessitera un suivi et un calibrage à long terme. En outre, cette optimisation devra prendre en compte l'historique des variations des températures extrêmes à l'échelle de la pépinière afin de mieux préciser la fréquence, la durée et l'intensité du gel, ainsi que les variations interannuelles des variables environnementales de chacun des secteurs représentatifs de la pépinière (températures minimales, durée, secteurs les plus froids, heures cumulées d'exposition au froid, etc.).

- l'approche de tolérance au gel, élaborée dans ce mémoire, pourra servir à :

  - caractériser l'endurcissement et le *désendurcissement* en pépinière en vue, de déterminer des seuils propres aux principales essences forestières utilisées dans les programmes de reboisement du Québec;
  - sélectionner des familles et des clones des essences commerciales et à croissance rapide en vue de reboiser les sites les plus nordiques;
  - promouvoir la sélection clonale hâtive des essences commerciales et à croissance rapide;
  - évaluer les risques de gel liés au déplacement des semences;
  - caractériser les seuils de tolérance au gel des vergers à graines.

Références bibliographiques

ANISKO, T., O.M. LINDSTROM et G. HOOGENBOOM, 1994. *Development of a cold hardiness model for deciduous woody plants*. Physiol. Plant. 91 : 375-382.

BANNISTER, P. et G. NEUNER, 2001. *Frost resistance and the distribution of conifers*. Dans : F.J. Bigras et S.J. Colombo (eds.). Conifer cold hardiness. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 3-21.

BEAULIEU, J., 1996. *Programme et stratégie d'amélioration génétique de l'épinette blanche au Québec*. Rapport d'information LAU-X-117. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Québec. 26 p.

BERNIER-CARDOU, M. et F. BIGRAS, 2001. *The analysis of cold hardiness experiments*. Dans : F.J. Bigras et S.J. Colombo (eds.). Conifer cold hardiness. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 403-435.

BIGRAS, F.J. et A.L. D'AOUST, 1992. *Hardening and dehardening of shoots and roots of containerized black spruce and white spruce seedlings under short and long days*. Can. J. For. Res. 22 : 388-396.

BIGRAS, F.J. et A.L. D'AOUST, 1993. *Influence of photoperiod on shoot and root frost tolerance and bud phenology of white spruce seedlings* (Picea glauca). Can. J. For. Res. 23 : 219-228.

BIGRAS, F.J., A. RYYPPÖ, A. LINDSTROM et E. SATTIN, 2001. *Cold acclimation and deacclimation of shoots and roots of conifer seedlings*. Dans : F.J. Bigras et S.J. Colombo (eds.). Conifer cold hardiness. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 57-88.

BINNIE, S.C., S.C. GROSSNICKLE et D.R. ROBERTS, 1994. *Fall acclimation patterns of interior spruce seedlings and their relationship to changes in vegetative storage proteins*. Tree Physiol. 14 : 1107-1120.

BLAKE, J., J. ZAERR et S. HEE, 1979. *Controlled moisture stress to improve cold hardiness and morphology of Dougals-fir seedlings*. For. Sci. 25 : 576-582.

BOIVIN, J.R., B.R. MILLER et V.R. TIMMER, 2002. *Late-season fertilisation of* Picea mariana *seedlings under greenhouse culture : biomass and nutrient dynamics*. Ann. For. Sci. 59 : 255-264.

CALMÉ, S., H.A. MARGOLIS et F.J. BIGRAS, 1993. *Influence of cultural practices on the relationship between frost tolerance and water content of containerized black spruce, white spruce, and jack pine seddlings*. Can. J. For. Res. 23 : 503-511.

CALMÉ, S., H.A. MARGOLIS, F.J. BIGRAS et D. MAILLY, 1995. *The relationship between water content and frost tolerance in shoots of hardwood seedlings*. Can. J. For. Res. 25 : 1738-1745.

CANNEL, M.G.R et R.I. SMITH, 1984. *Spring frost damage on young* Picea sitchensis. *2. Predicted dates of budburst and probability of frost damage*. Forestry 57 : 177-197.

COLAS, F., J. GAGNON, B.-M. GINGRAS, L. LABBÉ, M.S. LAMHAMEDI, N. THIFFAULT, D. TOUSIGNANT, F.M. TREMBLAY, M. BETTEZ et M. TOURIGNY, 2003. *La filière de production de plants au Québec : de la semence à la plantation*. Naturaliste Can. 127(2) : 77-84.

COLOMBO, S.J., 1990. *Bud dormancy status, frost hardiness, shoot moisture content, and readiness of black spruce container seedlings for frozen storage*. J. Am. Soc. Hort. Sci. 115 : 302-307.

COLOMBO, S.J., 1997. *Frost hardening spruce container stock overwintering in Ontario*. New Forests 13 : 449-467.

COLOMBO, S.J. et E.M. RAITONEN, 1993. *Frost hardening in first-year eastern larch* (Larix laricina) *container seedlings*. New Forests 7 : 55-61.

COLOMBO, S.J., C. GLERUM et D.O. WEBB, 1984. *Frost hardiness testing : An operational manual for use with extended greenhouse culture*. Ontario Ministry of Natural Resources, Forest Research Report No. 110. 14p.

COLOMBO, S.J., M.I. MENZIES et C. O'REILLY, 2001. *Influence of nursery cultural practices on cold hardiness of coniferous forest tree seedlings*. Dans : F.J. Bigras et S.J. Colombo (eds.). Conifer cold hardiness. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 223-252.

COURSOLLE, C., F.J. BIGRAS et H.A. MARGOLIS, 1998a. *Frost tolerance and hardening capacity during the germination and early developmental stages of four white spruce* (Picea glauca) *provenances*. Can. J. For. Res. 76 : 122-129.

COURSOLLE, C., F.J. BIGRAS, H.A. MARGOLIS et C. HEBERT, 1998b. *Growth and hardening of four provenances of containerized white spruce* (Picea glauca *[Moench] Voss) seedlings in response to the duration of 16h long-night treatments*. New For. 16 : 155-166.

DUMROESE, R.K., 2003. Hardening fertilization and nutrient loading of conifer seedlings. In : RILEY, L.E., R.K. DUMROESE et T.D. LANDIS, technical coordinators. National Proceedings : Forest and Conservation Nursery Associations—2002. Ogden, UT : USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Proceedings RMRS-P-28. p. 31-36.

ERIKSSON, G., I. EKBERG, I. DORMLING et B. MATERN, 1978. *Inheritance of bud-set and bud-flushing in* Picea abies *(L.) Karst*. Theor. Appl. Genet. 52 : 3-19.

FLØISTAD, I.S., 2002. *Effects of excessive nutrient supply and short day treatment on autumn frost hardiness and time of bud break in* Picea abies *seedlings*. Scand. J. For. Res. 17 : 295–303.

FLØISTAD, I.S. et K. KOHMAN, 2004. *Influence of nutrient supply on spring frost hardiness and time of bud break in Norwa spruce* (Picea abies *(L.) Karst.) seedlings*. New For. 27 : 1-11.

GAGNON, J., B.-M. GINGRAS, D. GIRARD, M.S. LAMHAMEDI, M. RENAUD, S. RICHARD, N. ROBERT et L. VEILLEUX, 2000. *Recherche et développement en production de plants*. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 453. 8 p.

GREER, D.H., C.J. STANLEY et I.J. WARRINGTON, 1989. *Photoperiod control of the initial phase of frost hardiness development in* Pinus radiata. Plant, Cell Env. 12 : 661-668.

GREER, D.H., I. LEINONEN et T. REPO, 2001. *Modelling cold hardiness development and loss in conifers*. Dans : F.J. Bigras et S.J. Colombo (eds.). Conifer Cold Hardiness. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 437-460.

GROSSNICKLE, S.C., 2000. *Ecophysiology of northern spruce seedlings. The performance of planted seedlings*. NRC Research Press, Ottawa, Canada. 407 p.

HANSEN, J.M. et E.N. ERIKSEN, 1993. *The effect of photosynthetic photon flux density on development of frost hardiness in top and roots of* Larix leptolepis *seedlings*. Scan. J. For. Res. 8 : 204-212.

HAVIS, J.R., 1976. *Root hardiness of woody ornamentals*. Hort. Sci. 11 : 385-386.

HAWKINS, C.D.B. et K.B. SHEWAN, 2000. *Frost hardiness, height, and dormancy of 15 short-day, nursery-treated interior spruce seed lots*. Can. J. For. Res. 30 : 1096-1105.

HAWKINS, C.D.B., A.M. EASTHAM, T.L. STORY, R.Y.N. ENG et D.A. DRAPER, 1996. *The effect of nursery blackout application on Sitka spruce seedlings*. Can. J. For. Res. 26 : 2201-2213.

HOWE, G.T., S.N. AITKEN, D.B. NEALE, K.D. JERMSTAD, N.C. WHELEER et H.H. CHEN, 2003. *From genotype to phenotype: unravelling the complexities of cold adaptation in forest trees*. Can. J. Bot. 81 : 1247-1266.

JERMSTAD, K.D., D.L. BASSONI, N.C. WHEELER, T.S. ANEKONDA, S.N. AITKEN, W.T. ADAMS et D.B. NEALE, 2001. *Mapping of quantitative trait loci controlling adaptive traits in coastal Douglas-fir. II. Spring and fall cold-hardiness.* Theor. Appl. Genet. 102 : 1152-1158.

JIAN, J., 1992. *Monitoring the development of cold tolerance in container-grown red pine and black spruce seedlings.* Thèse de maîtrise. Université du Maine, États-Unis. 41 p.

JOHNSEN, Ø et T. SKRØPPA, 2000. *Provenances and families show different patterns of relationship between bud set and frost hardiness in* Picea abies. Can. J. For. Res. 30 : 1858-1866.

JUNTTILA, O., 1989. *Physiological responses to low temperature.* Ann. Sci. For. 46 suppl. : 604-613.

KLEIN, R.M., T.D. PERKINS et H.L. MEYERS, 1989. *Nutrient status and winter hardiness of red spruce foliage.* Can. J. For. Res. 19 : 754-758.

LAMBANY, G., 1994. *La dynamique morphologique et physiologique de plants soumis à un entreposage de longue durée.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 114. 33 p.

LAMBANY, G. et M. RENAUD, 1996. *Étude des conditions de température observées dans une production de plants d'épinette blanche hivernés au sol ou déposés sur des plateaux de culture.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 415. 23 p.

LAMBANY, G. et M. RENAUD, 1998. *Étude des conditions de température observées dans une culture d'épinette noire 1+0 hivernée sous toile.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 431. 20 p.

LAMHAMEDI, M.S. et P.Y. BERNIER, 1994. *Ecophysiology and field performance of black spruce* (Picea mariana) *: a review.* Ann. Sci. For. 51 : 529-551.

LAMHAMEDI, M.S. et J. GAGNON, 2002. *Comment gérer la fertilisation et l'irrigation en vue d'améliorer la tolérance au gel des plants produits en récipients?* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Avis technique. 15 p.

LAMHAMEDI, M.S., G. LAMBANY, M. RENAUD, L. VEILLEUX et S. PLAMONDON, 2000a. *Gestion de l'irrigation en pépinière et évaluation des semis d'épinette blanche produits dans les récipients à parois ajourées.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 138. 36 p.

LAMHAMEDI, M.S., L. VEILLEUX, M. RENAUD, F. TALBOT, D. GIRARD et P. LAURENDEAU, 2000b. *Effets de trois modes de culture (ombrière, plastique microperforé et tunnel) sur l'endurcissement des semis d'épinette blanche (1+0) produits à la pépinière de Trécesson.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 110. 16 p.

LAMHAMEDI, M.S., G. LAMBANY, H.A. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX et P.Y. BERNIER, 2001 *Growth, physiology and leachate losses in* Picea glauca *seedlings (1+0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes.* Can. J. For. Res. 31 : 2200-2212.

LAMHAMEDI, M.S., M. RENAUD et H.A. MARGOLIS, 2002. *La réflectométrie dans le domaine temporel : une technique d'optimisation de l'irrigation et de réduction du lessivage en pépinières forestières au Québec.* Cahiers Agricultures 11 : 275-283.

LAMHAMEDI, M.S., H.A. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX et I. AUGER, 2003. *Effets de différentes règles d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (1+0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière.* Can. J. For. Res. 33 : 279-291.

LEINONEN, I., 1996. *A simulation model for the annual frost hardiness and freeze damage of Scots pine.* Ann. Bot. 78 : 687-693.

LEVITT, J., 1980. *Responses of plants to environmental stresses. Volume 1 : Chilling, freezing, and high temperature stresses.* Academic Press, New York, USA. 497 p.

LI, P., J. BEAULIEU et J. BOUSQUET, 1997. *Genetic structure and patterns of genetic variation among populations in eastern white spruce* (Picea glauca). Can. J. For. Res. 27 : 189-198.

LIM, C.C., S.L. KREES et R. ARORA, 1999. *A 25-kDa dehydrin associated with genotype-and age-dependent leaf freezing-tolerance in Rhododendron : a genetic marker for cold hardiness?* Theor. Appl. Genet. 99 : 912-920.

LIPPU, J., 1998. *Redistribution of ^{14}C-labelled reserve carbon in* Pinus sylvestris *seedlings during shoot elongation.* Silva Fennica 32 : 3-10.

MACEY, D.E. et J.T. ARNOTT, 1986. *The effect of moderate moisture and nutrient stress on bud formation and growth of container-grown white spruce seedlings.* Can. J. For. Res. 16 : 949-954.

MARGOLIS, H.A., 1987. *Seedling production and reforestation in Quebec.* J. For. 85 : 39-43.

MARSHALL, J.D., 1985. *Carbohydrate status as a measure of seedling quality.* Dans : M.L. Duryea (Ed.), Proceedings of the Workshop on Evaluating Seedling Quality : Principles, Procedures, and Predictive abilities of Major Tests, October 16-18, 1984. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis, OR. p. 49-58.

MENZIES, M.I., D.G. HOLDEN, L.M. GREEN et D.A. ROOK, 1981. *Seasonal changes in frost tolerance of* Pinus radiata *seedlings raised in different nurseries.* N. Z. J. For. Sci. 11 : 100-111.

MILLER, R.G., 1981. *Simulatenous statistical inference.* Springer-Verlag, New York. 299 p.

MILLIKEN, G.A. et D.E. JOHNSON, 1984. *Analysis of messy data. Vol 1. Designed experiments.* Van Nostrand Reinhold Company, New York. 473 p.

MRN, 1993. *Programme de surveillance dans les pépinières.* Dans : Insectes, maladies et feux dans les forêts québécoises, en 1993. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la conservation des forêts.

NORELL, L., G. ERICKSSON, I. EKBERG et I. DORMLING, 1986. *Inheritance of autumn frost hardiness in* Pinus sylvestris L. *seedlings.* Theor. Appl. Genet. 72 : 440-448.

PALTA, J.P. et L.S. WEISS, 1993. *Ice formation and freezing injury : An overview on the survival mechanism and molecular aspects of injury and cold acclimation in herbaceous plants.* Dans : Advances in Plant cold hardiness. Eds. P.H. Li et L. Christersson. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida : 143-176.

PELLICER, V., J.M. GUEHL, F.A. DAUDET, M. CAZET, L.M. RIVIÈRE et P. MAILLARD, 2000. *Carbon and nitrogen mobilization in* Larix x eurolepis *leafy stem cuttings assessed by dual ^{13}C and ^{15}N labelling : relationships with rooting.* Tree Physiol. 20 : 807-814.

PERRY, T.O., 1971. *Dormancy of trees in winter.* Science. 171 : 29-36.

PIHAKASKI-MAUNSBACH, K., I. TAMMINEN, M. PIETIAINEN et M. GRIFFITH, 2003. *Antifreeze proteins are secreted by winter rye cells in suspension culture.* Physiol. Plant. 118 : 390-398.

PREGITZER, K.S., 2003. *Woody plants, carbon allocation and fine roots.* New Phytol. 158 : 419-430.

REPO, T., G. ZHANG, A. RYYPPÖ, R. RIKALA et M. VUORINEN, 2000. *The relation between growth cessation and frost hardening in Scots pines of different origins.* Trees 14 : 456-464.

RIKALA, R. et T. REPO, 1997. *The effect of late summer fertilization on the frost hardening of second-year Scots pine seedlings.* New Forests 14 : 33-44.

RITCHIE, G.A., 1990. *A rapid method for detecting cold injury in conifer seedling root systems.* Can. J. For. Res. 20 : 26-30.

ROSE, R. et D.L. HAASE, 1996. *Irrigation for frost protection in forest nurseries : Room for improvement.* W. J. Appl. For. 11 : 16-19.

SAKAI, A. et W. LARCHER, 1987. *Frost survival of plants. Responses and adaptation to freezing stress.* Springer-Verlag, New York. 321 p.

SAUCIER, J.-P., J.-F. BERGERON, P. GRONDIN et A. ROBITAILLE, 1998. *Les régions écologiques du Québec méridional (3e version).* Supplément de l'Aubelle, n° 124, 12 p.

SCHUCH, U.K., M.L. DURYEA et L.H. FUCHIGAMI, 1989a. *Frost hardiness as acquired by Douglas-fir seedlings in three Pacific Northwest nurseries.* Can. J. For. Res. 19 : 192-197.

SCHUCH, U.K., M.L. DURYEA et L.H. FUCHIGAMI, 1989b. *Dehardening and budburst of Dougals-fir seedlings raised in three Pacific Northwest nurseries.* Can. J. For. Res. 19 : 198-203.

SIMPSON, D.G., 1994. *Seasonal and geographic origin effects on cold hardiness of white spruce buds, foliage, and stems.* Can. J. For. Res. 24 : 1066-1070.

STOWE, D.C., M.S. LAMHAMEDI et H.A. MARGOLIS, 2001. *Water relations, cuticular transpiration, and bud characteristics of air-slit containerized* Picea glauca *seedlings in response to controlled irrigation regimes.* Can. J. For. Res. 31 : 2200-2212.

THIBAULT, M. ET D. HOTTE, 1985. *Les régions écologiques du Québec méridional, deuxième approximation.* Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service cartographique.

THOMASHOW, M.F., 1999. *Plant cold acclimatation : Freezing tolerance genes and regulatory mechanisms.* Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 50 : 571-599.

TIMMIS, R., J. FLEWELLING et C. TALBERT, 1994. *Frost injury prediction model for Douglas-fir seedlings in the Pacific Northwest.* Tree Physiol. 14 : 855-869.

VAN DEN DRIESSCHE, R., 1970. *Measurement of frost-hardiness in Douglas-fir at three nurseries by an electrical method.* Forestry Chronicle 46 : 65-66.

VAN DEN DRIESSCHE, R., 1987. *Importance of current photosynthate to new root growth in planted conifer seedlings.* Can. J. For. Res. 17 : 776-782.

WAREING, P.F., 1956. *Photoperiodism in woody plants.* Annu. Rev. Plant Physiol. 7 : 191-214.

WEISER, C.J., 1970. *Cold resistance and injury in woody plants.* Science 169 : 1269-1278.

ZWIAZEK, J.J., S. RENAULT, C. CROSER, J. HANSEN et E. BECK, 2001. *Biochemical and biophysical changes in relation to cold hardiness.* Dans : F.J. Bigras et S.J. Colombo (eds.). Conifer cold hardiness. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 165-186.

Annexes

Annexe 1a. Seuils de tolérance au gel quotidiens[1] des plants d'épinette blanche (1+0) dans chacune des pépinières, en 1999

Date		Pampev				Sainte-Luce				Trécesson			
		Heures cumulées de froid[2]	Ratio MS/MF calculé[3]	Tolérance au gel (°C)		Heures cumulées de froid	Ratio MS/MF calculé	Tolérance au gel (°C)		Heures cumulées de froid	Ratio MS/MF calculé	Tolérance au gel (°C)	
				Parties aériennes[4]	Racines[5]			Parties aériennes	Racines			Parties aériennes	Racines
13	sept-99	0	25,57	-4,0	-4,0	0	26,33	-4,0	-4,0	0	26,68	-4,0	-4,0
14	sept-99	0	25,83	-4,3	-4,0	0	26,52	-4,3	-4,3	0	26,91	-4,3	-4,3
15	sept-99	0	26,09	-4,6	-4,0	0	26,71	-4,6	-4,6	0	27,14	-4,6	-4,6
16	sept-99	0	26,35	-4,9	-4,0	0	26,90	-4,9	-4,9	0	27,37	-4,9	-4,9
17	sept-99	0	26,61	-5,1	-4,0	0	27,09	-5,1	-5,1	0	27,60	-5,1	-5,1
18	sept-99	0	26,87	-5,4	-4,0	0	27,28	-5,4	-5,4	3	27,83	-5,4	-5,4
19	sept-99	7	27,13	-5,7	-4,0	0	27,47	-5,7	-5,7	3	28,06	-5,7	-5,7
20	sept-99	7	27,39	-6,0	-4,0	0	27,66	-6,0	-6,0	4	28,29	-6,0	-6,0
21	sept-99	7	27,65	-6,3	-4,0	0	27,85	-6,3	-6,3	11	28,52	-6,3	-6,3
22	sept-99	7	27,91	-6,6	-4,0	0	28,04	-6,6	-6,6	18	28,75	-6,6	-6,6
23	sept-99	7	28,17	-6,9	-4,0	0	28,23	-6,9	-6,9	18	28,98	-6,9	-6,9
24	sept-99	7	28,43	-7,1	-4,0	0	28,42	-7,1	-7,1	20	29,21	-7,1	-7,1
25	sept-99	7	28,69	-7,4	-4,0	0	28,61	-7,4	-7,4	20	29,44	-7,4	-7,4
26	sept-99	13	28,95	-7,7	-4,0	0	28,80	-7,7	-7,7	25	29,67	-7,7	-7,7
27	sept-99	17	29,21	-8,0	-4,0	0	28,99	-8,0	-8,0	25	29,90	-8,0	-8,0
28	sept-99	17	29,47	-8,0	-4,3	0	29,18	-8,0	-8,0	25	30,13	-8,8	-8,0
29	sept-99	17	29,73	-8,0	-4,5	0	29,37	-8,0	-8,0	25	30,36	-9,6	-8,0
30	sept-99	17	29,99	-8,0	-4,8	0	29,56	-8,0	-8,0	29	30,59	-10,4	-8,0
1	oct-99	17	30,25	-8,0	-5,1	0	29,75	-8,0	-8,0	40	30,82	-11,2	-8,0
2	oct-99	24	30,51	-8,0	-5,3	0	29,94	-8,0	-8,0	52	31,05	-12,0	-8,0
3	oct-99	24	30,77	-8,0	-5,6	3	30,13	-8,0	-8,0	66	31,28	-12,8	-8,0
4	oct-99	29	31,03	-8,0	-5,9	14	30,32	-8,0	-8,0	79	31,51	-13,6	-8,0
5	oct-99	42	31,29	-8,0	-6,1	27	30,51	-8,0	-8,0	88	31,74	-14,4	-8,0
6	oct-99	58	31,55	-8,0	-6,4	42	30,70	-8,0	-8,0	103	31,97	-15,2	-8,0
7	oct-99	73	31,81	-8,0	-6,7	56	30,89	-8,0	-8,0	119	32,20	-16,0	-8,0
8	oct-99	83	32,07	-8,0	-6,9	71	31,08	-8,0	-8,0	129	32,43	-16,8	-8,0
9	oct-99	86	32,33	-8,0	-7,2	80	31,27	-8,0	-8,0	135	32,66	-17,6	-8,0
10	oct-99	95	32,59	-8,0	-7,5	89	31,46	-8,0	-8,0	142	32,89	-18,4	-8,0
11	oct-99	100	32,85	-8,0	-7,7	95	31,65	-8,0	-8,0	155	33,12	-19,2	-8,0
12	oct-99	115	33,11	-8,0	-8,0	110	31,84	-8,0	-8,0	165	33,35	-20,0	-8,0
13	oct-99	119	33,37	-8,9	-8,3	120	32,03	-8,9	-8,3	171	33,58	-20,0	-8,3
14	oct-99	125	33,63	-9,9	-8,6	130	32,22	-9,9	-8,6	185	33,81	-20,0	-8,6
15	oct-99	135	33,89	-10,8	-8,9	146	32,41	-10,8	-8,9	197	34,04	-20,0	-8,9
16	oct-99	140	34,15	-11,7	-9,2	155	32,60	-11,7	-9,2	199	34,27	-20,0	-9,2
17	oct-99	140	34,41	-12,6	-9,5	157	32,79	-12,6	-9,5	218	34,50	-20,0	-9,5
18	oct-99	146	34,67	-13,5	-9,9	174	32,98	-13,5	-9,9	239	34,73	-20,0	-9,9
19	oct-99	163	34,93	-14,5	-10,2	192	33,17	-14,5	-10,2	256	34,96	-20,0	-10,2
20	oct-99	174	35,19	-15,4	-10,5	208	33,36	-15,4	-10,5	275	35,19	-20,0	-10,5
21	oct-99	185	35,45	-16,3	-10,8	221	33,55	-16,3	-10,8	293	35,42	-20,0	-10,8
22	oct-99	194	35,71	-17,2	-11,1	231	33,74	-17,2	-11,1	308	35,65	-20,0	-11,1
23	oct-99	200	35,97	-18,2	-11,4	238	33,93	-18,2	-11,4	324	35,88	-20,0	-11,4

Annexe 1a (suite). Seuils de tolérance au gel quotidiens[1] des plants d'épinette blanche (1+0) dans chacune des pépinières, en 1999

Date		Pampev				Sainte-Luce				Trécesson			
		Heures cumulées de froid[2]	Ratio MS/MF calculé[3]	Tolérance au gel (°C)		Heures cumulées de froid	Ratio MS/MF calculé	Tolérance au gel (°C)		Heures cumulées de froid	Ratio MS/MF calculé	Tolérance au gel (°C)	
				Parties aériennes[4]	Racines[5]			Parties aériennes	Racines			Parties aériennes	Racines
24	oct-99	214	36,23	-19,1	-11,7	252	34,12	-19,1	-11,7	348	36,11	-20,0	-11,7
25	oct-99	231	36,49	-20,0	-12,0	269	34,31	-20,0	-12,0	370	36,34	-20,0	-12,0
26	oct-99	246	36,75	-20,0	-12,6	293	34,50	-20,0	-12,6	394	36,57	-20,0	-12,6
27	oct-99	262	37,01	-20,0	-13,1	317	34,69	-20,0	-13,1	413	36,80	-20,0	-13,1
28	oct-99	277	37,27	-20,0	-13,7	341	34,88	-20,0	-13,7	434	37,03	-20,0	-13,7
29	oct-99	293	37,53	-20,0	-14,3	361	35,07	-20,0	-14,3	451	37,26	-20,0	-14,3
30	oct-99	303	37,79	-20,0	-14,9	385	35,26	-20,0	-14,9	459	37,49	-20,0	-14,9
31	oct-99	312	38,05	-20,0	-15,4	389	35,45	-20,0	-15,4	467	37,72	-20,0	-15,4
1	nov-99	326	38,31	-20,0	-16,0	404	35,64	-20,0	-16,0	476	37,95	-20,0	-16,0
2	nov-99	335	38,57	-20,0	-16,6	410	35,83	-20,0	-16,6	489	38,18	-20,0	-16,6
3	nov-99	338	38,83	-20,0	-17,1	410	36,02	-20,0	-17,1	513	38,41	-20,0	-17,1
4	nov-99	361	39,09	-20,0	-17,7	426	36,21	-20,0	-17,7	537	38,64	-20,0	-17,7
5	nov-99	373	39,35	-20,0	-18,3	437	36,40	-20,0	-18,3	561	38,87	-20,0	-18,3
6	nov-99	384	39,61	-20,0	-18,9	453	36,59	-20,0	-18,9	585	39,10	-20,0	-18,9
7	nov-99	408	39,87	-20,0	-19,4	474	36,78	-20,0	-19,4	609	39,33	-20,0	-19,4
8	nov-99	408	40,13	-20,0	-20,0	492	36,97	-20,0	-20,0	621	39,56	-20,0	-20,0

[1] Le pépiniériste pourra déterminer à l'avance les seuils de tolérance au gel graduels des plants d'épinette blanche (1+0) estimés selon le ratio de matière sèche de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (1+0) ou le cumul du nombre d'heures d'exposition au froid.

[2] Le nombre d'heures cumulées d'exposition au froid (n) à la base des plants d'épinette blanche (1+0) est calculé selon des données météorologiques enregistrées dans chacune des pépinières à des intervalles réguliers de 15 minutes, de la façon suivante :

$$n = \sum_{j} \sum_{i=1}^{i=24} (Tr - Th)\text{, avec } (Tr - Th) > 0$$

Tr : température de référence (= 5 °C)

Th : température horaire enregistrée (°C)

i : heure de la journée (1 jour = 24 heures)

j : jour julien dont la période d'évaluation s'est étalée de la mi-septembre jusqu'au début novembre.

[3] Le ratio de la matière sèche journalier de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (RMS) spécifique à chaque pépinière et à chaque provenance est calculé selon la relation linéaire simple reliant le RMS au cumul du nombre d'heures d'exposition au froid (Figure 15).

[4, 5] Les seuils journaliers de tolérance au gel des parties aériennes et des racines des plants d'épinette blanche (1+0) sont calculés à partir des pentes des seuils d'endurcissement entre deux dates d'échantillonnage consécutives. Ces seuils sont déterminés de manière à ce qu'aucun constituant du plant ne soit endommagé.

Annexe 1b. Seuils de tolérance au gel quotidiens[1] des plants d'épinette blanche (1+0) dans chacune des pépinières, en 2000

Date	CPPFQ				Normandin				Sargim			
	Heures cumulées de froid[2]	Ratio MS/MF calculé[3]	Tolérance au gel (°C)		Heures cumulées de froid	Ratio MS/MF calculé	Tolérance au gel (°C)		Heures cumulées de froid	Ratio MS/MF calculé	Tolérance au gel (°C)	
			Parties aériennes[4]	Racines[5]			Parties aériennes	Racines			Parties aériennes	Racines
11 sept-00	13	26,69	-4,0	-4,0	26	28,26	-4,0	-4,0	4	28,34	-4,0	-4,0
12 sept-00	13	27,00	-4,0	-4,0	26	28,49	-4,0	-4,0	4	28,52	-4,0	-4,0
13 sept-00	13	27,31	-4,0	-4,0	26	28,72	-4,0	-4,0	4	28,70	-4,0	-4,0
14 sept-00	13	27,62	-4,0	-4,0	26	28,95	-4,0	-4,0	4	28,88	-4,0	-4,0
15 sept-00	13	27,93	-4,0	-4,0	26	29,18	-4,0	-4,0	4	29,06	-4,0	-4,0
16 sept-00	13	28,24	-4,0	-4,0	26	29,41	-4,0	-4,0	4	29,24	-4,0	-4,0
17 sept-00	13	28,55	-4,0	-4,0	26	29,64	-4,0	-4,0	4	29,42	-4,0	-4,0
18 sept-00	13	28,86	-4,0	-4,0	27	29,87	-4,0	-4,0	4	29,60	-4,0	-4,0
19 sept-00	13	29,17	-4,0	-4,0	27	30,10	-4,0	-4,0	4	29,78	-4,0	-4,0
20 sept-00	13	29,48	-4,0	-4,0	27	30,33	-4,0	-4,0	4	29,96	-4,0	-4,0
21 sept-00	13	29,79	-4,0	-4,0	27	30,56	-4,0	-4,0	4	30,14	-4,0	-4,0
22 sept-00	13	30,10	-4,0	-4,0	28	30,79	-4,0	-4,0	4	30,32	-4,0	-4,0
23 sept-00	13	30,41	-4,0	-4,0	37	31,02	-4,0	-4,0	11	30,50	-4,0	-4,0
24 sept-00	13	30,72	-4,0	-4,0	37	31,25	-4,0	-4,0	11	30,68	-4,0	-4,0
25 sept-00	23	31,03	-4,0	-4,0	46	31,48	-4,0	-4,0	21	30,86	-4,0	-4,0
26 sept-00	33	31,34	-4,5	-4,0	55	31,71	-4,5	-4,0	29	31,04	-4,5	-4,0
27 sept-00	40	31,65	-5,1	-4,0	60	31,94	-5,1	-4,0	36	31,22	-5,1	-4,0
28 sept-00	54	31,96	-5,6	-4,0	74	32,17	-5,6	-4,0	45	31,40	-5,6	-4,0
29 sept-00	64	32,27	-6,1	-4,0	86	32,40	-6,1	-4,0	54	31,58	-6,1	-4,0
30 sept-00	71	32,58	-6,7	-4,0	86	32,63	-6,7	-4,0	54	31,76	-6,7	-4,0
1 oct-00	71	32,89	-7,2	-4,0	86	32,86	-7,2	-4,0	54	31,94	-7,2	-4,0
2 oct-00	71	33,20	-7,7	-4,0	86	33,09	-7,7	-4,0	54	32,12	-7,7	-4,0
3 oct-00	71	33,51	-8,3	-4,0	88	33,32	-8,3	-4,0	54	32,30	-8,3	-4,0
4 oct-00	73	33,82	-8,8	-4,0	99	33,55	-8,8	-4,0	58	32,48	-8,8	-4,0
5 oct-00	80	34,13	-9,3	-4,0	113	33,78	-9,3	-4,0	66	32,66	-9,3	-4,0
6 oct-00	89	34,44	-9,9	-4,0	135	34,01	-9,9	-4,0	77	32,84	-9,9	-4,0
7 oct-00	104	34,75	-10,4	-4,0	159	34,24	-10,4	-4,0	86	33,02	-10,4	-4,0
8 oct-00	118	35,06	-10,9	-4,0	176	34,47	-10,9	-4,0	95	33,20	-10,9	-4,0
9 oct-00	134	35,37	-11,5	-4,0	192	34,70	-11,5	-4,0	102	33,38	-11,5	-4,0
10 oct-00	154	35,68	-12,0	-4,0	216	34,93	-12,0	-4,0	115	33,56	-12,0	-4,0
11 oct-00	169	35,99	-12,6	-4,6	232	35,16	-12,6	-4,6	128	33,74	-12,6	-4,6
12 oct-00	178	36,30	-13,2	-5,2	243	35,39	-13,2	-5,2	138	33,92	-13,2	-5,2
13 oct-00	178	36,61	-13,9	-5,9	254	35,62	-13,9	-5,9	143	34,10	-13,9	-5,9
14 oct-00	178	36,92	-14,5	-6,5	265	35,85	-14,5	-6,5	154	34,28	-14,5	-6,5
15 oct-00	189	37,23	-15,1	-7,1	282	36,08	-15,1	-7,1	164	34,46	-15,1	-7,1
16 oct-00	206	37,54	-15,7	-7,7	299	36,31	-15,7	-7,7	181	34,64	-15,7	-7,7
17 oct-00	223	37,85	-16,3	-8,3	317	36,54	-16,3	-8,3	201	34,82	-16,3	-8,3
18 oct-00	231	38,16	-16,9	-8,9	341	36,77	-16,9	-8,9	212	35,00	-16,9	-8,9
19 oct-00	237	38,47	-17,6	-9,6	356	37,00	-17,6	-9,6	212	35,18	-17,6	-9,6
20 oct-00	246	38,78	-18,2	-10,2	366	37,23	-18,2	-10,2	219	35,36	-18,2	-10,2
21 oct-00	251	39,09	-18,8	-10,8	373	37,46	-18,8	-10,8	231	35,54	-18,8	-10,8
22 oct-00	269	39,40	-19,4	-11,4	391	37,69	-19,4	-11,4	248	35,72	-19,4	-11,4
23 oct-00	285	39,71	-20,0	-12,0	406	37,92	-20,0	-12,0	266	35,90	-20,0	-12,0
24 oct-00	294	40,02	-20,0	-12,6	413	38,15	-20,0	-12,6	280	36,08	-20,0	-12,6
25 oct-00	307	40,33	-20,0	-13,1	429	38,38	-20,0	-13,1	296	36,26	-20,0	-13,1

Annexe 1b (suite). Seuils de tolérance au gel quotidiens[1] des plants d'épinette blanche (1+0) dans chacune des pépinières, en 2000

Date	CPPFQ				Normandin				Sargim			
	Heures cumulées de froid[2]	Ratio MS/MF calculé[3]	Tolérance au gel (°C)		Heures cumulées de froid	Ratio MS/MF calculé	Tolérance au gel (°C)		Heures cumulées de froid	Ratio MS/MF calculé	Tolérance au gel (°C)	
			Parties aériennes[4]	Racines[5]			Parties aériennes	Racines			Parties aériennes	Racines
26 oct-00	310	40,64	-20,0	-13,7	433	38,61	-20,0	-13,7	305	36,44	-20,0	-13,7
27 oct-00	310	40,95	-20,0	-14,3	437	38,84	-20,0	-14,3	309	36,62	-20,0	-14,3
28 oct-00	329	41,26	-20,0	-14,9	461	39,07	-20,0	-14,9	314	36,80	-20,0	-14,9
29 oct-00	353	41,57	-20,0	-15,4	480	39,30	-20,0	-15,4	338	36,98	-20,0	-15,4
30 oct-00	377	41,88	-20,0	-16,0	497	39,53	-20,0	-16,0	354	37,16	-20,0	-16,0
31 oct-00	396	42,19	-20,0	-16,6	515	39,76	-20,0	-16,6	369	37,34	-20,0	-16,6
1 nov-00	416	42,50	-20,0	-17,1	533	39,99	-20,0	-17,1	379	37,52	-20,0	-17,1
2 nov-00	435	42,81	-20,0	-17,7	550	40,22	-20,0	-17,7	388	37,70	-20,0	-17,7
3 nov-00	451	43,12	-20,0	-18,3	568	40,45	-20,0	-18,3	403	37,88	-20,0	-18,3
4 nov-00	467	43,43	-20,0	-18,8	591	40,68	-20,0	-18,8	416	38,06	-20,0	-18,8
5 nov-00	483	43,74	-20,0	-19,4	615	40,91	-20,0	-19,4	432	38,24	-20,0	-19,4
6 nov-00	*	44,05	-20,0	-20,0	*	41,14	-20,0	-20,0	*	38,42	-20,0	-20,0

[1] Le pépiniériste pourra déterminer à l'avance les seuils de tolérance au gel graduels des plants d'épinette blanche (1+0) estimés selon le ratio de matière sèche de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (1+0) ou le cumul du nombre d'heures d'exposition au froid.

[2] Le nombre d'heures cumulées d'exposition au froid (n) à la base des plants d'épinette blanche (1+0) est calculé selon des données météorologiques enregistrées dans chacune des pépinières à des intervalles réguliers de 15 minutes, de la façon suivante :

$$n = \sum_{j} \sum_{i=1}^{i=24} (Tr - Th) \text{, avec } (Tr - Th) > 0$$

Tr : température de référence (= 5°C)

Th : température horaire enregistrée (°C)

i : heure de la journée (1 jour = 24 heures)

j : jour julien dont la période d'évaluation s'est étalée de la mi-septembre jusqu'au début novembre.

[3] Le ratio de la matière sèche journalier de la partie aérienne des plants d'épinette blanche (RMS) spécifique à chaque pépinière et à chaque provenance est calculé selon la relation linéaire simple reliant le RMS au cumul du nombre d'heures d'exposition au froid (Figure 15).

[4,5] Les seuils journaliers de tolérance au gel des parties aériennes et des racines des plants d'épinette blanche (1+0) sont calculés à partir des pentes des seuils d'endurcissement entre deux dates d'échantillonnage consécutives. Ces seuils sont déterminés de manière à ce qu'aucun constituant du plant ne soit endommagé.

Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
Sainte-Foy (Québec) G1P 3W8
Téléphone : (418) 643-7994
Télécopieur : (418) 643-2165
Site Web : http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissance/recherche
Courriel : recherche.forestiere@mrnfp.gouv.qc.ca

Pour satisfaire ses objectifs de reboisement, le ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, s'assure qu'on met bien tout en oeuvre pour optimiser les règles de culture, lors de la production des semis en pépinière. Les recherches entreprises par le Ministère sur l'optimisation de l'irrigation, la nutrition minérale et la tolérance au gel constituent des éléments essentiels à la production de plants de qualité supérieure et à la réduction des pertes de semis occasionnées par le gel. Ces travaux et ceux qu'on mène actuellement sur l'élaboration des seuils de tolérance au gel eu égard aux régions écologiques permettront aux pépiniéristes de mieux cibler les périodes de risque de dommages occasionnés aux plants par le gel et ainsi de prendre les mesures adéquates de protection.

Ressources naturelles, Faune et Parcs
Québec